

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONARME BİNALARDA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN SARSMA MASASI DENEYLERİ
İLE İNCELENMESİ VE DENEYSEL YÖNTEMLERE DAYALI HASAR TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Fezayil SUNCA

MART 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETONARME BİNALARDA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN SARSMA MASASI DENEYLERİ
İLE İNCELENMESİ VE DENEYSEL YÖNTEMLERE DAYALI HASAR TESPİTİ**

İnş. Yük. Müh. Fezayil SUNCA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 20 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Betonarme Binalarda Çarpışma Etkisinin Sarsma Masası Deneyleri ile İncelenmesi ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti” başlıklı bu tez çalışması; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak yürütülmüştür.

Bu çalışma sırasında her adımda benimle yakından ilgilenen, bilgilerini, desteğini ve dikkatini benden bir an olsun esirgemeyen ve tecrübelerinden her daim yararlandığım değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Hocalarım Prof. Dr. Süleyman ADANUR, Prof. Dr. Barış SEVİM, Prof. Dr. Murat Emre KARTAL ve Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ’ye ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a, Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ’e, Arş. Gör. Ali KAYA’ya, Arş. Gör. Fatih Yesevi OKUR’a, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT’a, Arş. Gör. Zafer YILMAZ’a, İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN OKUR’a, İnş. Yük. Müh. Mustafa YILMAZ’a, İnş. Müh. Algihan KARAHASAN’a, İnş. Müh. Ali SARIKOÇ’a, İnş. Müh. Muhammed Cihat ŞAHİN’e, İnş. Müh. Yasin GÜRPINAR’a ve desteklerini her zaman hissettiğim Sivas Cumhuriyet Üniversitesi’ndeki kıymetli hocalarıma kalpten teşekkürler ederim.

Bu çalışma için Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında maddi destek sağlayan KTÜ-Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, bana karşı inançlarını her an hissettiğim ve beni bu günlere getiren babam Sayın SUNCA’ya, annem Zeliha SUNCA’ya ve kardeşlerime müteşekkirdiğimi belirtirim. Desteklerinden dolayı başta Mehmet Salih KÖSE ve Nevin KÖSE olmak üzere Trabzon’daki ailemin tüm fertlerine teşekkür ederim. Tanıdığım günden beri karşılaştığım tüm zorluklara ve sıkıntılara karşı desteği ve şefkati ile yanımda olan eşim İnş. Yük. Müh. Gülfem Çisem KÖSE SUNCA’ya ve bu süreçte tüm yorgunluğumu, güçlükleri ve dertlerimi unutmama vesile olan biricik oğlum Mehmet Alp SUNCA’ya sonsuz minnet duygularımı ifade ederim.

Fezayil SUNCA

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Betonarme Binalarda Çarpışma Etkisinin Sarsma Masası Deneyleri ile İncelenmesi ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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. 20/03/2023

Fezayil SUNCA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Komşu Binalar Arasındaki Çarpışmalar ile İlgili Yapılan Araştırmalar	3
1.2.1. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Taraması	3
1.2.2. Analitik ve Sayısal Çalışmaları İçeren Literatür Taraması.....	15
1.2.3. Çarpışma Etkilerini Azaltmak Amacıyla Gerçekleştirilen Çalışmalar	20
1.2.3.1. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Taraması	20
1.2.3.2. Analitik ve Sayısal Çalışmaları İçeren Literatür Taraması.....	24
1.2.4. Deneysel Yöntemlerle Hasar Tespitini İçeren Literatür Taraması	27
1.3. Tezin Amacı.....	27
1.4. Komşu Binalar Arasındaki Çarpışma Türleri	30
1.4.1. Biri Diğere göre Daha Ağır Olan Komşu Binaların Çarpışması	31
1.4.2. Kat Yükseklikleri Farklı Komşu Binaların Çarpışması.....	31
1.4.3. Farklı Yüksekliğe Sahip Komşu Binaların Çarpışması	33
1.4.4. Burulma Kaynaklı Komşu Binaların Çarpışması	33
1.4.5. Aynı Sıradaki İkidenden Fazla Komşu Binanın Çarpışması	34
1.5. Geçmiş Depremlerde Meydana Gelen Çarpışma Hasarları.....	34
1.6. Komşu Binalar Arasındaki Derzler Mesafeleri	38
1.7. Dinamik Karakteristiklerin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi.....	43
1.7.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ekipman ve Sistemler	43

1.7.1.1.	Titreştiriciler	43
1.7.1.1.1.	Darbe Çekiçleri	44
1.7.1.1.2.	Sarsıcılar	44
1.7.1.2.	İvmeölçerler	45
1.7.1.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	46
1.7.2.	Deneyisel Modal Analiz Yöntemi ile Alakalı Genel Esaslar	49
1.7.3.	Deneyisel Modal Analiz Yöntemine Ait Denklemler.....	50
1.7.3.1.	Çevresel Titreşim Yöntemi.....	50
1.7.3.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi	52
1.7.3.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi	53
1.8.	Çevresel Titreşim Testlerine Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri.....	54
1.8.1.	Doğal Frekanslara Dayalı Hasar Tespiti.....	55
1.8.2.	Mod Şekillerine Dayalı Hasar Tespiti	56
1.8.2.1.	Modal Güvence Kriteri	56
1.8.2.2.	Koordinat Modal Güvence Kriteri.....	57
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	59
2.1.	Giriş	59
2.2.	Deneyisel Program.....	60
2.3.	Deney Numunelerine Ait Geometrik Özellikler ve Üretim.....	63
2.3.1.	Deney Numunelerinin Ölçeklendirilmesi	65
2.3.2.	Deney Numunelerinin Detaylandırılması	67
2.3.4.	Deney Numunelerinin İmalatı	74
2.3.5.	Malzeme Özelliklerinin Tayini.....	77
2.3.5.1.	Beton Basınç Deneyleri	78
2.3.5.2.	Beton Yarmada Çekme Dayanım Deneyleri	83
2.3.5.3.	Donatı Çekme Deneyleri	84
2.4.	Deney Düzeneginin Tasarımı ve Üretimi	86
2.4.1.	İlave Kat Kütleleri	86
2.4.2.	Düzlem Dışı Hareketi Engelleyen Çelik Çerçevesel ve Çarpışma Duvarı	86
2.5.	Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Aletleri.....	92
2.5.1.	Sarsma Masası	92
2.5.2.	İvmeölçerler	94
2.5.3.	Lineer Potansiyometrik Cetvel (LPDT).....	95

2.5.4.	Çevresel Titreşim Testlerinde Kullanılan Cihazlar	97
2.6.	Yer Hareketlerinin Belirlenmesi ve Ölçeklendirilmesi	99
2.7.	Pilot Deneyler ile Deney Düzeneklerinin Uygunluğunun Değerlendirilmesi ..	103
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	121
3.1.	Giriş	121
3.2.	Kat İvmeleri	123
3.3.	Yer Değiştirmeler	142
3.4.	Taban Kesme Kuvvetleri	163
3.5.	Dinamik Karakteristikler	172
3.5.1.	Referans Deney.....	173
3.5.2.	Deney-1 (Kat Yükseklikleri Farklı Binaların Çarpışması).....	178
3.5.3.	Deney-2 (Farklı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması)	183
3.5.4.	Deney-3 (Aynı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması).....	189
3.5.5.	Deney-4 (Aynı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması-Kauçuklu).....	194
3.5.6.	Çarpışma Türleri İçin Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması	200
3.6.	Sarsma Masası Deneyleri Sonrası Oluşan Hasar Biçimleri.....	210
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	225
5.	KAYNAKLAR	235
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BETONARME BİNALARDA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN SARSMA MASASI DENEYLERİ İLE
İNCELENMESİ VE DENEYSEL YÖNTEMLERE DAYALI HASAR TESPİTİ

Fezayil SUNCA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2023, 251 Sayfa

Bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile binaların farklı çarpışma türleri için çarpışma davranışlarının belirlenmesi, çarpışma sonrası oluşan hasarların binaların performanslarına olan etkilerinin deneysel yöntemler kullanarak incelenmesi ve çarpışma etkilerini azaltmak için kullanılabilecek uygun yöntemlerin araştırılması amaçlanmıştır. Tez kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında bulunan sarsma masasının kapasitesi göz önünde bulundurularak 1/2 ölçekli betonarme düzlem çerçeve bina modelleri kullanılmıştır. Binalar arasındaki çarpışma davranışının incelendiği deneysel çalışmalar iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin ve ölçüm sistemlerinin uygunluğunun değerlendirilmesi için 2 adet betonarme deney numunesi kullanılarak pilot deneyler gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, 5 adet betonarme deney numunesi kullanılarak farklı çarpışma türlerinin dikkate alındığı çarpışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında, çevresel titreşim testleri ile dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiş ve hasar tespit çalışmaları yürütülmüştür. Frekans değişimleri ile yürütülen hasar tespit çalışmalarının yanı sıra mod şekillerindeki değişimleri dikkate alan hasar tespit yöntemleri de bu çalışmada kullanılmıştır. Deneyler neticesinde çarpışmanın betonarme yapıların yapısal tepkilerini önemli ölçüde artırdığı, çarpışma türlerinin yapısal hasarlar üzerinde önemli etkilerinin olduğu ve çarpışma bölgelerinde kullanılan kauçuk levhaların çarpışma nedeniyle oluşan yapısal tepkileri önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Çarpışma, Çevresel titreşim testi, Deprem, Hasar tespiti, Sarsma masası

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF POUNDING EFFECT IN RC BUILDINGS BY SHAKE TABLE TESTS AND DAMAGE DETECTION BASED ON EXPERIMENTAL METHODS

Fezayil SUNCA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2023, 251 Pages

This thesis aims to determine the pounding behavior of buildings for different pounding scenarios, to examine the effects of pounding damage on the performance of buildings using experimental methods, and to investigate appropriate methods that can be used to reduce the pounding effects with shake table tests. Within the scope of the thesis, half-scale two-dimensional RC test specimens were used considering the capacity of the shake table in the Structural Health Monitoring Laboratory of Karadeniz Technical University. Experimental studies consist of two parts. In the first part, pilot tests were carried out using two RC test specimens to evaluate the suitability of the experimental setup, selected ground motions, and measurement systems. In the second part, pounding tests were carried out by using five RC test specimens, considering different pounding scenarios. In addition, ambient vibration tests were performed before and after each shaking table test and thus dynamic characteristics were identified and experimental damage detection based on experimental methods was carried out. Damage detection methods that take into account changes in frequency and mode shapes were used. As a result of the experiments, it was determined that the pounding significantly increased the structural responses of the RC test specimens, pounding scenarios were effective on the structural damages, and the rubber bumpers used in the collision zones remarkably reduced the structural responses due to the pounding.

Key Words: Reinforced concrete, Pounding, Ambient vibration test, Earthquake, Damage detection, Shake table

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Burulmalı çarpışma etkilerinin araştırılması amacıyla Chau vd. (2004) tarafından tercih edilen deney düzeneği	6
Şekil 1.2. Asimetrik binaların burulmalı çarpışmasını araştırmak Chau vd. (2006) tarafından kullanılan 1/45 ölçekli bina modelleri	7
Şekil 1.3. Jankoski (2010) tarafından gerçekleştirilen serbest düşme ve sarsma masası deneylerine ait görseller.....	8
Şekil 1.4. Khatiwada ve Chouw (2013) tarafından benimsenen deney düzeneği.....	9
Şekil 1.5. El-Khoriby vd. (2015) tarafından sıralı binaların çarpışmasının incelendiği numuneler	12
Şekil 1.6. Miari ve Jankowski (2022a) tarafından çarpışma deneyleri için kullan çelik çerçeveler	13
Şekil 1.7. Takabatake vd. (2014) tarafından çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen testlere ait görsel	22
Şekil 1.8. Kolon-döşeme çarpışmaları nedeniyle betonarme binalarda oluşan hasar.....	32
Şekil 1.9. Farklı yüksekliğe sahip komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar.....	33
Şekil 1.10. 1985 Mexico City depreminde benzer yüksekliğe sahip komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar.....	35
Şekil 1.11. 1985 Mexico City depreminde komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar	35
Şekil 1.12. 2010 Darfield depreminde hasar gören yığma bina.....	36
Şekil 1.13. 2011 Christchurch depremi sonrasında hasar gören komşu binalar	37
Şekil 1.14. Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekici.....	44
Şekil 1.15. APS400 tipi mekanik sarsıcı.....	45
Şekil 1.16. B&K 8340, B&K 4507 B 005 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ve B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçer.....	46
Şekil 1.17. Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi.....	47
Şekil 1.18. Frekans ve zaman alanlarında dinamik karakteristik belirleme yöntemleri....	51
Şekil 1.19. Çevresel titreşim testlerine ait akış şeması	51
Şekil 2.1. Deney düzeneğine ait şematik gösterim	62
Şekil 2.2. Dikkate alınan her bir çarpışma türü için çarpışma bölgelerine ait şematik görünüm.....	63

Şekil 2.3. Tam ölçekli bina modeline ait görünüşler ve deney numunelerinin tasarımı dikkate alınan çerçeve	65
Şekil 2.4. Temel aplikasyon planı, sarsma masası bağlantı ve temel donatı detayları	68
Şekil 2.5. Kolon aplikasyon planı	69
Şekil 2.6. Kolon düşey açılımları.....	70
Şekil 2.7. Kalıp planı, ilave yük bağlantı detayları ve döşeme donatı detayları.....	71
Şekil 2.8. Kiriş donatı detayları	72
Şekil 2.9. Temel kalıbı ve donatılarının hazırlanışı, beton dökümü	74
Şekil 2.10. 1. kat kalıp ve donatı imalatı, beton dökümüne ait görseller.....	75
Şekil 2.11. 2. kat kalıp ve donatı imalatı, beton dökümüne ait görseller.....	76
Şekil 2.12. Deney numunelerinin laboratuvara taşınması	77
Şekil 2.13. Betondan alınan küp ve silindir numuneler	79
Şekil 2.14. Küp deney numunelerinin beton basınç dayanım testleri.....	80
Şekil 2.15. Silindir deney numunelerinin beton basınç dayanım testleri.....	81
Şekil 2.16. Temel betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	82
Şekil 2.17. 1. kat betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	82
Şekil 2.18. 2. kat betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	82
Şekil 2.19. Beton yarmada çekme dayanım testi	84
Şekil 2.20. $\phi 8$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	85
Şekil 2.21. $\phi 10$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	85
Şekil 2.22. $\phi 12$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	85
Şekil 2.23. Çarpışma duvarına ait detaylar ve üç boyutlu görünüm.....	87
Şekil 2.24. Çarpışma elemanına ait boyutlar ve üç boyutlu görünüm	88
Şekil 2.25. Çelik çerçeve ve rulman sistemine ait üç boyutlu görünüm.....	88
Şekil 2.26. Çelik çerçeve ve rulman sistemine ait detaylar	89
Şekil 2.27. Deney düzeneğine ait şematik gösterim	90
Şekil 2.28. Kurulumu tamamlanan deney düzeneği	91
Şekil 2.29. Çarpışma duvarı ve kullanılan çarpışma elemanları.....	91
Şekil 2.30. Kat seviyesine teşkil edilen ilave kütleler	92
Şekil 2.31. Kat seviyelerine yerleştirilen rulmanlar.....	92
Şekil 2.32. Tek eksenli 500kN yatay kuvvet ile sarsma masası kapasite grafiği	93
Şekil 2.33. Sarsma masası.....	93
Şekil 2.34. Tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama sistemi.....	94

Şekil 2.35. Üç eksenli ivmeölçer ve veri toplama sistemi	95
Şekil 2.36. İvmeölçerlere ait konum ve doğrultular	95
Şekil 2.37. Deneylerde kullanılan LPDT'ler	96
Şekil 2.38. LPDT konum ve doğrultuları.....	97
Şekil 2.39. Çevresel titreşim testleri için ölçüm alınan noktalar ve referans ivmeölçer konumu	98
Şekil 2.40. Çevresel titreşim testlerine ait görseller	99
Şekil 2.41. 1992 Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ölçeklendirilmiş ve ölçeklendirilmemiş ivme-zaman grafiği	100
Şekil 2.42. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri.....	101
Şekil 2.43. Sarsma masası PID ayarları	102
Şekil 2.44. Uygulanan ve sarsma masasından ölçülen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	103
Şekil 2.45. Pilot deneylerde kullanılan deney numunelerine ait eleman boyutları ve donatı yerleşim planları	105
Şekil 2.46. Pilot deneylerde kullanılan deney numunelerine ait görseller	106
Şekil 2.47. Pilot deneyler için kurulan deney düzeneğine ait görseller.....	107
Şekil 2.48. Güçlendirilmemiş deney numunesinde düzlem içi ve dışı ivmelerin karşılaştırılması.....	109
Şekil 2.49. Güçlendirilmiş deney numunesinde düzlem içi ve dışı ivmelerin karşılaştırılması.....	110
Şekil 2.50. Güçlendirilmemiş deney numunesinde sarsma masası ve temel yer değiştirmelerinin karşılaştırılması	111
Şekil 2.51. Güçlendirilmiş deney numunesinde sarsma masası ve temel yer değiştirmelerinin karşılaştırılması	112
Şekil 2.52. Güçlendirilmemiş deney numunesi ve çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değiştirmelerin karşılaştırılması	113
Şekil 2.53. Güçlendirilmiş deney numunesi ve çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değiştirmelerin karşılaştırılması	114
Şekil 2.54. Güçlendirilmemiş deney numunesinde ivmelerin çarpışma ile değişimi.....	115
Şekil 2.55. Güçlendirilmiş deney numunesinde ivmelerin çarpışma ile değişimi.....	116
Şekil 2.56. Pilot deneyler sonrası güçlendirilmemiş numunede meydana gelen hasarlar.....	117
Şekil 2.57. Pilot deneylerde güçlendirilmemiş numunenin çarpışma bölgesinde meydana gelen hasarlar.....	118

Şekil 2.58. Yeniden tasarlanan çarpışma elemanına ait boyutlar ve üç boyutlu görünüm	119
Şekil 2.59. Yeniden tasarlanan çarpışma elemanının üretimine ve yerleşimine ait görseller	120
Şekil 3.1. %25 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri.....	125
Şekil 3.2. %25 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri.....	126
Şekil 3.3. %50 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri.....	127
Şekil 3.4. %50 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri.....	128
Şekil 3.5. %75 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri.....	129
Şekil 3.6. %75 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri.....	130
Şekil 3.7. %100 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri.....	131
Şekil 3.8. %100 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri.....	132
Şekil 3.9. %100 Parkfield depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri	133
Şekil 3.10. %100 Parkfield depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri	134
Şekil 3.11. Çarpışmanın kat ivmeleri üzerindeki etkisi	137
Şekil 3.12. %100 Erzincan ve Parkfield depremleri ile gerçekleştirilen sarsma masası deneyler sırasında Deney-3 ve Deney-4'te 2. kat seviyesinde elde edilen ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması.....	138
Şekil 3.13. Yer hareketi büyüklüğüne bağlı olarak ivme büyütme faktörlerinin değişimi.....	140
Şekil 3.14. İvme büyütme faktörleri	141
Şekil 3.15. %25 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	146
Şekil 3.16. %25 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	147
Şekil 3.17. %50 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	148
Şekil 3.18. %50 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	149
Şekil 3.19. %75 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	150
Şekil 3.20. %75 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri.....	151
Şekil 3.21. %100 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri....	152
Şekil 3.22. %100 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri....	153
Şekil 3.23. %100 Parkfield depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri ...	154
Şekil 3.24. %100 Parkfield depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri ...	155
Şekil 3.25. Çarpışmanın yer değiştirmeler üzerindeki etkisi	156
Şekil 3.26. Göreli kat öteleme oranları	160
Şekil 3.27. Referans deneye kıyasla çarpışmanın gerçekleştiği yönde göreli kat ötelemesi oranlarında meydana gelen değişimler.....	161

Şekil 3.28. Referans deneye kıyasla çarpışmanın olmadığı serbest yönde görelî kat ötelemesi oranlarında meydana gelen değişimler.....	162
Şekil 3.29. Referans deneye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri.....	164
Şekil 3.30. Deney-1'e ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	165
Şekil 3.31. Deney-2'ye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	166
Şekil 3.32. Deney-3'ye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	167
Şekil 3.33. Deney-4'e ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	168
Şekil 3.34. Referans deneye kıyasla taban kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişimler (%)	170
Şekil 3.35. Deney-3 ve Deney-4'e ait taban kesme kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	171
Şekil 3.36. Referans deneyde elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	173
Şekil 3.37. Referans deneyde elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi	177
Şekil 3.38. Referans deneyde elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi.....	177
Şekil 3.39. Referans deneyde elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi	178
Şekil 3.40. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1'de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	178
Şekil 3.41. Deney-1'de elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi.....	182
Şekil 3.42. Deney-1'de elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi	183
Şekil 3.43. Deney-1'de elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi.....	183
Şekil 3.44. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2'de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	184
Şekil 3.45. Deney-2'de elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi.....	188
Şekil 3.46. Deney-2'de elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi	188
Şekil 3.47. Deney-2'de elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi.....	189
Şekil 3.48. Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3'de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	189
Şekil 3.49. Deney-3'te elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi.....	193
Şekil 3.50. Deney-3'te elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi	194
Şekil 3.51. Deney-3'te elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi.....	194
Şekil 3.52. Deney-4'te elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	195
Şekil 3.53. Deney-4'te elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi.....	199

Şekil 3.54. Deney-4'te elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi	199
Şekil 3.55. Deney-4'te elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi.....	200
Şekil 3.56. Hasar durumlarına göre ilk iki moda ait frekansların değişimi	202
Şekil 3.57. Hasar indeksleri	205
Şekil 3.58. MGK değerlerinin (%) artan hasarla değişimi.....	206
Şekil 3.59. 1-KMGK değerlerinin değişimi.....	208
Şekil 3.60. Referans deneyde oluşan hasarlar.....	211
Şekil 3.61. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1'de oluşan hasarlar	215
Şekil 3.62. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının neden olduğu kolon hasarlarının karşılaştırılması.....	218
Şekil 3.63. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2'de oluşan hasarlar	219
Şekil 3.64. 1985 Mexico City depreminde farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar.....	221
Şekil 3.65. Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3'te oluşan hasarlar	222
Şekil 3.66. Çarpışma etkilerini azaltmak için kauçuk levhaların kullanıldığı Deney-4'te oluşan hasarlar	223

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Titreşim testleri için önerilen ölçüm süreleri.....	50
Tablo 2.1. Deneylerde çeşitli büyüklükler için dikkate alınan ölçek katsayıları (λ).....	67
Tablo 2.2. Deney numunelerine ait beton metrajı.....	73
Tablo 2.3. Deney numunelerine ait donatı metrajı.....	73
Tablo 2.4. Küp deney numunelerinin beton basınç dayanım değerleri	80
Tablo 2.5. Silindir deney numunelerinin beton basınç dayanım değerleri	81
Tablo 2.6. Beton yarmada çekme dayanım ve karakteristik eksenel çekme dayanım değerleri	83
Tablo 2.7. $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$ donatılara ait mekanik özellikler	84
Tablo 2.8. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait özellikler	102
Tablo 3.1. Kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri.....	124
Tablo 3.2. 1. Kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri	145
Tablo 3.3. 2. Kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri	145
Tablo 3.4. 1. Kat seviyesinde elde edilen görelî kat öteleme oranları	158
Tablo 3.5. 2. Kat seviyesinde elde edilen görelî kat öteleme oranları	158
Tablo 3.6. Taban kesme kuvvetleri	169
Tablo 3.7. Referans deneyde elde edilen frekans ve sönüm oranları.....	176
Tablo 3.8. Deney-1’de elde edilen frekans ve sönüm oranları	181
Tablo 3.9. Deney-2’de elde edilen frekans ve sönüm oranları	187
Tablo 3.10. Deney-3’te elde edilen frekans ve sönüm oranları	192
Tablo 3.11. Deney-4’te elde edilen frekans ve sönüm oranları	198
Tablo 3.12. Titreşim testleri sonucunda elde edilen frekans değerleri	203
Tablo 3.13. Titreşim testleri sonucunda elde edilen sönüm oranları	203

SEMBOLLER DİZİNİ

*	Kompleks eşlenik
A	Alan
a	İvme
a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
ABS	Mutlak Toplam
A_k	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k . artık değer matrisi
C_d	Yer değiştirme büyütme faktörü
CQC	Tam Karesel Birleştirme
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
DDC	Çift Fark
DI	Hasar İndeksi
DMA	Deneysel Modal Analiz
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f	Frekans
g	Yerçekimi ivmesi
GFOA	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyallerinin GSY fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyallerinin GSY fonksiyonu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Transfer matrisi
H_{max}	Komşu binalardan daha yüksek olanının toplam yüksekliği
I	Bina önem katsayısı
KMGK	Koordinat Modal Güvence Kriteri
l	Uzunluk
LPDT	Lineer Potansiyometrik Cetvel
m	Kütle

MGK	Modal Güvence Kriteri
M_M	Deney numunesinin ağırlığı
M_{m0}	Deney numunesinin kütlesi
M_{m1}	Deney numunesine ilave edilecek kat kütlesi
M_P	Ölçeklendirilmemiş bina ağırlığı
M_r	Kütle oranı
n	Mod sayısı
N_m	Mod şekli sayısı
OMA	Operasyonel Modal Analiz
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research Center
PID	Proportional, Integral, Derivative
q	Davranış faktörü
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_e	Donatı akma dayanımı
R_k	Artık değer fonksiyonu
R_m	Donatının çekme dayanımı
S	Derz mesafesi
s	Tekil değer
S_{ae}	Spektral ivme
S_i	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
s_{ij}	Skaler tekil değerler
S_L	Ölçek faktörü
SRSS	Kareleri Toplamının Karekökü
SYMMD	Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri
t	Zaman
T	Doğal titreşim periyodu
T_m	Deprem hakim periyodu
U	Binaların tasarım yer değiştirmesi
U_i	Tekil vektörleri içeren bütün matris
u_{ij}	Tekil vektörler
V	Hacim
v	Hız
$X_i(w)$	Frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonu

$X_k(t)$	Zaman tanım alanındaki yapay etki sinyali
$Y_k(t)$	Zaman tanım alanındaki tepki fonksiyonu
$Y_k(w)$	Frekans tanım alanındaki etki fonksiyonu
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
Δ	Değişim oranı
δ_M	Binaların elastik olmayan yer değiştirmesi
δ_{max}	En büyük elastik yer değiştirme
Δ_u	Binalar için izin verilen elastik olmayan yer değiştirme değeri
ε	Şekil değiştirme
ε_{su}	Donatı kopma uzaması
λ_k	Kutup fonksiyonu
ν	Poisson oranı
ξ	Sönüm oranı
ρ	Kolerasyon faktörü
σ	Gerilme
ϕ	Mod şekil vektörü
ω	Açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde özellikle nüfusun fazla olduğu kentsel yerleşim bölgelerinde bitişik nizam uygulanarak inşa edilen binalara arazinin sınırlı olması, çevre düzenlemesine uyulmaması ve mimari kaygılar gibi sebeplerden dolayı çok sık rastlanmaktadır (Çetinkaya, 2011; Gökdemir, 2019). Bu duruma örnek olarak, Eskişehir ilinin önemli bir caddesine ait istatistikler, bu caddedeki komşu binaların yalnızca %36'sının iyi bir şekilde ayrıldığını, binaların %64'ünün çarpışma riski altında olduğunu göstermektedir (Doğan ve Günaydın, 2009). Deprem yönetmeliklerinde belirtilmesine rağmen, tasarım aşamasında binaların ayrı ayrı düşünülüp komşu binalar arasındaki etkileşimin incelenmemesi veya bu etkileşimlerden doğan kesit tesirlerinin göz ardı edilmesi gibi sebeplerden dolayı komşu binalar arasında yetersiz boşluklar bırakılmaktadır. Yönetmeliklerde belirtilen boşluk miktarları her bina için ayrı ayrı analiz edilmediğinden, olası bir deprem sırasında yönetmelik gereği bırakılan boşluk miktarlarının da yeterli olup olmayacağı bilinmemektedir. Bu durum, farklı dinamik özelliklere (kütle, rijitlik vb.) sahip komşu binaların olası depremler sonrasında farklı yer değiştirmeler yaparak çarpışabileceğini ve bu çarpışma sonucu yapılarda beklenmeyen hasarların oluşabileceğini göstermektedir (Jankowski, 2009).

Tasarım ve inşa aşamasında çoğu zaman ihmal edilen bu çarpışma etkileri, etkileşimin gerçekleştiği binalarda hızda ani değişikliklere neden olarak, ivme değerlerinde kısa süreli ve yüksek genlikte pikler oluşturur. Komşu binalar arasındaki çarpışmadan kaynaklı bu pikler, kat ve taban kesme kuvvetlerinde önemli artışlara neden olabilmektedir. Bu ise çarpışma etkilerinin tasarım sırasında dikkate alınmaması durumunda, olası depremlerde beklenenden çok daha büyük yapısal tepkilerin meydana gelebileceğini ve yapısal elemanlarda beklenmedik hasarların oluşabileceğini ortaya koymaktadır (Miari vd., 2019). Depremler sonrası yapılan araştırmalar, yapılarda oluşan bölgesel hasarların genellikle binalar arasındaki yetersiz derz boşluğunun neden olduğu çarpışmalardan kaynaklandığını, bu çarpışmaların yapılarda toptan göçmeye neden olabileceğini ve çarpışma etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur (Rosenblueth ve Meli, 1986; Kasai ve Maison, 1991; Raheem vd., 2019).

Çarpışma olaylarının çoğu deprem kaynaklı olsa da aşırı rüzgar yükleri gibi büyük yanal yüklere neden olabilecek diğer etkilerde komşu binalar arasında etkileşime neden olabilmektedir (Brown ve Elshaer, 2022).

Komşu binalar arasındaki çarpışma birçok şekilde gerçekleşebilmekte ve çarpışmalar binaların sadece en üst katlarda değil orta katlarında da meydana gelebilmektedir. Bina türü yapılar için çarpışma çeşitleri 5 grupta toplanmıştır: (i) biri diğerine göre daha ağır olan binaların çarpışması, (ii) kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması, (iii) farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması, (iv) eksantrik çarpışma, (v) ikiden fazla bina arasında meydana gelen çarpışma. Bunlara ek olarak yığma binalar arasındaki çarpışmalara ayrılmış olan altıncı tip etkileşim türü de araştırmacılar tarafından sunulmuştur (Cole vd., 2010a; Cole vd., 2012). Meydana gelen her bir çarpışma türü yapılarda farklı hasarlara sebep olabilmekte, bazı çarpışma türlerinde yapısal hasarlar daha belirgin hale gelebilmekte ve binaların tamamen göçmesine sebep olabilmektedir. Bunlara ek olarak köprü tabliyelerindeki genişleme derzlerinde de çarpışmaların meydana gelebildiği ve bu çarpışmalar sonucu köprü kirişlerinin yuvalarından çıkabildiği ve tabliyelerde hasarların meydana gelebildiği geçmiş yıllardaki depremler de gözlemlenmiştir (Muthukumar, 2003).

Mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı vb.) kütle ve rijitlik ile ilişkili olduğu için, bunlarda meydana gelebilecek değişim hasarın varlığı ile ilişkilendirilebilir. Nitekim son yıllarda inşaat mühendisliği yapılarında yapısal bütünlüğün ve sağlığın izlenmesi amacıyla tahribatsız bir yöntem olan Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir (Baghiee vd., 2009; Altunışık vd., 2017; Altunışık vd., 2019a; Akhlaghi vd., 2021; Kita vd., 2021; Sunca vd., 2021a). DMA'da deneysel ölçümler mevcut yapı üzerinden alınması sebebiyle elde edilen sonuçlarla yapının ölçüm alındığı andaki gerçek durumu temsil edilmektedir. DMA yönteminde, taşıyıcı sistem elemanlarına yerleştirilen hassas sensörler vasıtasıyla yapıya ait ham titreşim verileri elde edilmekte ve veri toplama sistemine aktarılmaktadır. Elde edilen ham veriler programlar vasıtasıyla işlenerek yapıya ait dinamik karakteristikler tanımlanmaktadır. Bu yöntem ölçüm sırasında dikkate alınan etkiye bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır: (i) Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY), (ii) Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY). İlk yöntemde, yapı bilinen ve ölçülebilen bir etki ile uyarılmakta ve bu uyarım altında yapıda oluşan tepkiler kullanılmaktadır. ÇTY'de ise çevresel etkiler nedeniyle uyarılan yapıda meydana gelen tepkiler ölçülmektedir. Verilerin değerlendirilmesinde ise frekans ve zaman tanım alanında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Farklı zaman aralıklarında ve/veya sürekli olarak gerçekleştirilen titreşim testleri ile elde edilen dinamik karakteristikler kıyaslanarak yapısal bütünlük ve hasarın varlığı irdelenmektedir. Bu irdeleme sırasında frekans, mod şekli ve sönüm oranındaki değişimleri dikkate alan bağıntılar kullanılmaktadır. Bunlarda meydana gelen değişimler göz önüne alınarak taşıyıcı sistem elemanlarında hasarın varlığı, var ise konumu ve büyüklüğü hakkında kapsamlı değerlendirmeler yapılabilmektedir (Okur, 2017).

1.2. Komşu Binalar Arasındaki Çarpışmalar ile İlgili Yapılan Araştırmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde, komşu binalar arasında çarpışma ve bunların yapısal davranışa olan etkileri üzerine geçmiş yıllarda yapılan çalışmalara yer verilmiştir. İlk olarak, sarsma masası deneyleri ile binalar arasındaki çarpışmaların incelenmesi üzerine literatür taraması gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, konu ile alakalı gerçekleştirilen analitik çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü kısımda, çarpışma etkilerinin azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalar ele alınmıştır. Son bölümde ise DMA ile binaların çarpışma davranışı ele alan çalışmalara ait literatür taramasına yer verilmiştir.

1.2.1. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Taraması

Ülkemizde ve dünya genelinde yaygın olarak kullanılan birçok yönetmelik, tasarımcılara binalar arasında bırakılması gereken boşluk miktarları için çeşitli yöntemler ve koşullar sunmuştur. Ancak, yönetmeliklerde verilen bu boşluk oranlarının bina ve yer hareketinin özelliklerine bağlı olarak yetersiz olabileceği geçmiş yıllarda yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir (Rajaram ve Kumar, 2012; Dertli, 2017; Dertli vd., 2017; Ateş, 2018; Kamal ve İnel, 2022a). Binalar arasında bırakılması gereken boşluk oranlarının belirlenmesi ve çarpışma davranışının incelenmesi için literatürde yapılan çalışmaların çoğunlukla analitik veya küçük ölçekli deneylere dayandığı görülmektedir. Öte yandan, binalar arasındaki çarpışmaların bazı çalışmalarda bina davranışı açısından olumlu bazı çalışmalarda ise olumsuz etkilere sebep olduğu tespit edilmiştir. Yine bazı çalışmalarda ağır binaların hafif binalara göre çarpışmadan daha fazla etkilendiği bazı çalışmalarda ise bunun tam aksi sonuçlar elde edilmesi gibi bir takım çelişkiler bulunmaktadır.

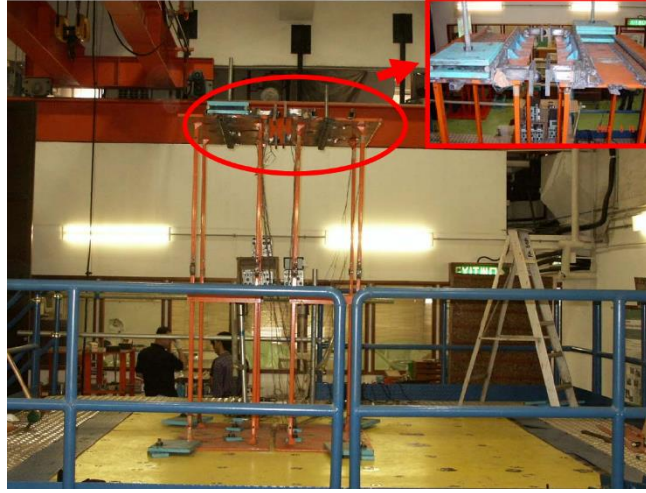
Komşu binalar arasındaki çarpışmayı sarsma masası üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalar ile deneysel olarak inceleyen ilk araştırmacılar Papadrakakis ve Mouzakis (1995)'tir. Betonarme binalardaki çarpışma davranışını hazırladıkları 2 katlı bina modellerini kullanarak araştırmışlardır. Deneyleri hem çarpışmanın dikkate alınmadığı hem de çarpışmanın dikkate alındığı durum için sinüzoidal ve gerçek ivme kayıtlarını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, çarpışmaların rijit olan binanın yer değiştirme tepkilerini artırırken esnek olan binanın yer değiştirme tepkilerini azalttığını tespit etmişlerdir.

Filiatrault vd. (1995), binalar arasındaki çarpışmayı incelemek için o dönem yaygın olarak kullanılan SLAM-2 ve PC-ANSR programlarından elde edilen verilerin doğruluğunu ve farklı yapısal düzenlerin çarpışma üzerindeki etkilerini tespit etmek için biri 3 diğeri 8 katlı iki bina modeli kullanarak sarsma masası deneylerini gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri binalar tek açıklıklı 1/8 ölçeklerinde olup çarpışma deneylerini 3.00×3.00m boyutlarındaki sarsma masasında gerçekleştirmişlerdir. 4 farklı yapısal düzen, 3 farklı yoğunlukta ivme kaydı ve çeşitli boşluk oranları kullanarak 34 deney gerçekleştirmişlerdir. Ancak analitik modeller ile deney sonuçlarını karşılaştırırken 1940 yılında meydana gelmiş El-Centro depremine ait ivme kaydının maksimum yer ivmesini 0.15g ve 0.50g olacak şekilde ölçeklendirerek iki farklı yoğunlukta ivme kaydını kullanmışlardır ve binalar arasında bitişik, 15.0mm ve çarpışma olmadığı boşluk miktarlarını dikkate almışlardır. Deneyler sonucunda, yüksek binanın göreceli kat ötelenmelerinin çarpışma sebebiyle artarken kısa binanın göreceli kat ötelenmelerinde azalmalar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Çarpışmanın olmadığı durumda 8 katlı binada döşeme-döşeme çarpışması için maksimum kat ivme değeri 2.50g olarak elde edilirken boşluk miktarının yetersiz olduğu durumda çarpışmanın meydana geldiği katta 12.00g ivme değeri elde etmişlerdir. Ancak çarpışmanın döşeme-kolon arasında gerçekleşmesi durumunda, 8 katlı binada etkileşimin meydana geldiği kattaki ivme değerlerinin 23.00g'ye yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bu sebeple döşeme-kolon çarpışmalarının çok daha tehlikeli olduğunu ifade etmişlerdir. İnceledikleri analitik modellerin başlangıçta deney sonuçlarından oldukça farklı sonuçlar verdiğini, kalibre sonrası deney sonuçlarıyla yakın sonuçlar elde edildiğini ifade etmişlerdir. Bu sebeple çarpışma davranışını incelemek için kullanılan programlarda kalibrasyon yapılmasının sonuçların sağlığı açısından oldukça önemli olduğunu vurgulamışlardır. Öte yandan, incelenen binaların deneyler sırasında çarpışma nedeniyle dönme hareketi

yaptıklarını ve katlarda meydana gelen bu görelî dönmelerin incelenen programlarda dikkate alınmadığını tespit etmişlerdir.

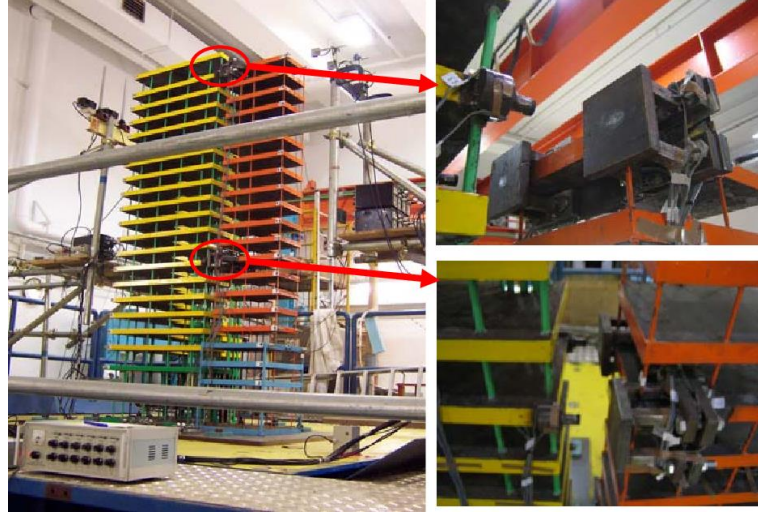
Chau vd. (2003), farklı dinamik özelliklere (farklı frekanslara ve sönüm oranlarına) sahip iki çelik kayma çerçevesi arasındaki çarpışma davranışlarını, yaptıkları sarsma masası deneyleri ile araştırmıştır. Ayrıca Chau ve Wei'nin (2001) yapılar arasındaki çarpışma davranışını temsil etmek için geliştirdikleri lineer olmayan çarpışma modelinin ne denli gerçek sonuçlar verdiğini de incelemiştir. Bu çalışmada, yapıların frekanslarını ve sönüm oranlarını, yer hareketi olarak çeşitli genlikte ve frekansta sinüs dalgalarını, gerçek deprem dalgalarını ve kayma çerçeveleri arasında ki farklı deprem derzi mesafelerini deney değişkeni olarak kullanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma sonrası, ağır binanın hafif olan binaya göre çarpışmadan fazla etkilendiğini, çarpışmanın ağır binanın tepkilerini artırırken hafif binanın tepkilerini azalttığını ortaya koymuşlardır. Yapılar arasındaki çarpışmayı engellemek için yapıların frekansları ile deprem derzi miktarları arasında bir bağıntı geliştirmeye çalışmışlardır. Ayrıca deneylerden elde edilen çarpışma hızları ve çarpışma mesafeleri, Chau ve Wei'nin (2001) geliştirdikleri çarpışma modelinin niteliksel olarak doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Chau vd. (2004), Hong Kong Polytechnic Üniversitesi'nde mevcut 3.00×3.00m boyutlarındaki sarsma masasında gerçekleştirdikleri çarpışma deneyleri ve analitik çalışmalar ile yapılarındaki burulmanın binalar arasındaki çarpışmaya olan etkilerini araştırmışlardır. Deney düzeneğine ait görseller Şekil 1.1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan kayma çerçevelerinde burulma davranışını elde etmek için, yapı üzerindeki kütleler yapıların köşe noktalarına yerleştirmişlerdir. Bu çalışmada, değişken olarak yapıların kütleleri ve eksantrisite oranları, farklı genlik ve frekanslardaki sinüs dalgaları kullanılmıştır. Çeşitli eksantrisite oranları için yapılan deneyler sonucunda, ağır olan binanın hafif olan binaya oranla çarpışmadan daha az etkilendiği ve hız-yer değiştirme grafiğinin oldukça düzgün olduğunu, hafif binaların çarpışma hasarlarına karşı daha hassas ve çarpışma kaynaklı hareketlerin daha net gözlemlenebileceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca burulma özelliği olan binalarda yapısal tepkilerin (dönme ve burulma) burulmadan dolayı arttığı tespit etmişlerdir.



Şekil 1.1. Burulmalı çarpışma etkilerinin araştırılması amacıyla Chau vd. (2004) tarafından tercih edilen deney düzeneği

Chau vd. (2006), geçmiş yıllarda binalar arasındaki etkileşim üzerine yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalardan (Chau ve Wei, 2001; Chau vd., 2003) elde ettikleri sonuçları geliştirmek, asimetrik binaların burulmalı çarpışma potansiyelini araştırmak ve burulmalı çarpışma için yeni bir teorik çarpışma modeli geliştirmek amacıyla 21 katlı çok serbestlik dereceli asimetrik binalar kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan binaların her ikisi de Hong Kong Adasında mevcut olup deneyler için bu binaların 1/45 ölçekte modellerini üretmişlerdir (Şekil 1.2). Binaların oldukça yüksek olması ve asimetrik bir plana sahip olması nedeniyle yüksek mod katkılarının göz önüne alınması gerektiğini ve bu sebeple çarpışmanın sadece en üst katta değil ara katlarda da oluşabileceğini vurgulamışlardır. Bu durumun tespiti için binalarda hem en üst kata hem de ara katlarda çarpışma noktaları yerleştirmişlerdir. Bu noktalarda meydana gelen çarpışma kuvvetlerinin tespiti içinse gerinim ölçerler kullanmışlardır. Sisteme verilen hareketin frekansı, büyüklüğü ve binalar arasındaki derz miktarları gibi değişkenler kullanılarak 100 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, binalar arasında boşluk bırakılmaması durumunda çarpışmanın hem ara katlarda hem de çatı katında gerçekleştiğini, binalar arasında boşluk bırakılması durumunda ise çarpışmanın çatı katında daha baskın olduğunu ve ara katlardaki çarpışmanın sebebini ise yüksek mod katkıları olarak belirtmişlerdir. Ayrıca çarpışma olmaması durumunda herhangi bir yükleme sonucu hasar almayacak olan hafif binada, aynı yükleme için çarpışma olması durumunda ağır binadan aktarılacak olan enerji sebebiyle büyük tepkilerin oluşacağını tespit etmişlerdir. Bu nedenle var olan binalara bitişik olarak inşa edilecek yeni binaların özel çözümler ile inşa edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.



Şekil 1.2. Asimetrik binaların burulmalı çarpışmasını araştırmak Chau vd. (2006) tarafından kullanılan 1/45 ölçekli bina modelleri

Rezavani ve Moghamad (2007), iki boyutlu, tek açıklıklı ve küçük ölçekli modeller üzerinde gerçekleştirdikleri analitik ve deneysel çalışmalarda, yaygın çarpışma tiplerinden olan döşeme-döşeme çarpışma tipini incelemişlerdir. Ayrıca yapılar arasındaki etkileşimin etkilerini azaltmak için deneyler sırasında çeşitli deprem derzi oranları, binaların birlikte çalışması için bağıntı elemanları ve çarpışma noktalarında sönümleyici malzeme kullanmışlardır. Çalışmalarında, harmonik yükler ve geçmişte meydana gelmiş bazı deprem kayıtlarını kullanmışlardır. Ancak incelenen yapıların çarpışma sırasında hasar görmemeleri için bu deprem kayıtlarını %60 oranında azaltmışlardır. Sarsma masası deneylerinde katlarda meydana gelen ivme ve yer değiştirme değerlerinde ki değişimleri incelemişlerdir. Analitik ve deneysel sonuçlar, binalar arasındaki çarpışmada, yer hareketinin frekans içeriğinin önemini göstermektedir. Binaların üst katlarından birbirlerine bağlanmasının ve çarpışma noktalarında kullanılan sönümleyici elemanların ivme ve deplasman değerlerini oldukça düşürdüğünü de tespit etmişlerdir.

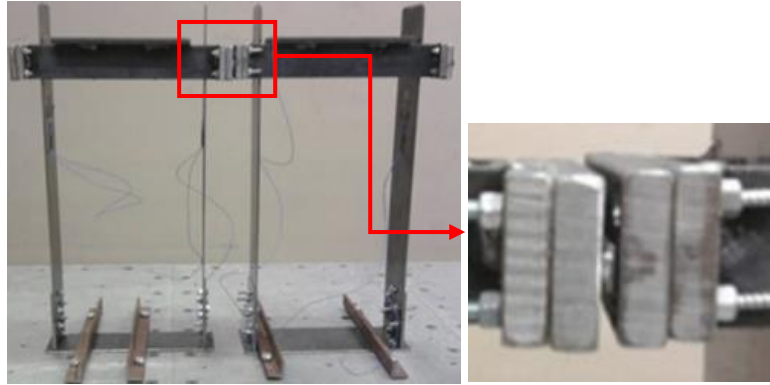
Jankowski (2010), deprem kaynaklı çarpışmaların incelenmesinde analitik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan viskoelastik çarpışma modelinin doğru olarak yansıtılabilmesi için gerekli olan çarpışma katsayılarının literatürde çok farklı değerler aldığını tespit etmiştir. Literatürde belirtilen çarpışma katsayılarında ki bu belirsizliği incelemek ve binaların inşasında yaygın olarak kullanılan beton, çelik, ahşap ve seramik gibi farklı malzemelerin deprem anındaki çarpışma davranışını ortaya koymak için deneyler gerçekleştirmiştir. İlk deneyde, farklı malzemelerden imal edilmiş topları rijit bir yüzeye

sahip deney düzeneğine farklı yüksekliklerden düşürmüş ve oluşan çarpışma kuvvetini ölçmüştür. İkinci deneyde ise farklı malzemeler kullanarak ürettiği küçük ölçekli bina modellerinin çarpışma davranışını sarsma masasında incelemiştir. İlk deney sonucunda, çarpışma katsayısının kütleyle bağlı olmadığını ancak topun ilk çarpma anındaki hızının bu katsayı üzerinde oldukça etkili olduğunu tespit etmiş ve deneylerde kullandığı her bir malzemenin çarpışma katsayısının hesabı için başlangıç çarpışma hızına bağlı bağıntılar sunmuştur. Ayrıca en büyük çarpışma katsayılarını seramik malzeme için gerçekleştirilen deneylerden elde ederken, en küçük çarpışma katsayılarını ahşap malzemedede elde etmiştir. Sarsma masası deneylerinde aynı malzemelerden yapılmış (beton-beton, çelik-çelik, ahşap-ahşap ve seramik-seramik) iki kayma çerçevesi kullanmıştır (Şekil 1.3). Yapıda kullanılan malzemenin binalar arasındaki çarpışma davranışını büyük oranda etkilediğini, en büyük yer değiştirmelerin ve en çok çarpışmanın çelik-çelik modelde gerçekleştiği tespit etmiştir. Ayrıca, esnek binaların rijit binalara göre çarpışmadan daha fazla etkilendiğini ve bu durumun Papadrakakis ve Mouzakis'in (1995) ve Chau vd.'nin (2003) yaptığı deneysel çalışmalar sonucu elde ettikleri bulguların tam tersi olduğunu ifade etmiştir. Ancak bu farklılığın çalışmada incelenen binaların kütlelerinin birbirine çok yakın olmasından kaynaklanacağını belirtmiştir. Bütün bu sonuçlara ek olarak, çarpışmanın binaların tepkilerini genel olarak artırdığını ancak bazı durumlarda yapılarıdaki yer değiştirmeleri azaltarak pozitif etkiler de oluşturabileceğini vurgulamıştır.



Şekil 1.3. Jankoski (2010) tarafından gerçekleştirilen serbest düşme ve sarsma masası deneylerine ait görseller

Khawwaja ve Chouh (2013) yaptıkları literatür çalışmasında, sıralı binaların çarpışmasında köşelerdeki binaların çarpışmadan daha çok etkilendiği, ortadaki binaların ise çarpışmadan etkilenmediğini ifade etmişlerdir. Bu sebeple, sarsma masası üzerinde gerçekleştirdikleri küçük ölçekli deneylerde yan yana iki bina ve yan yana üç binanın deprem sırasındaki çarpışma davranışlarını incelemişlerdir (Şekil 1.4). Deneylerde farklı rijitlik ve farklı kütlelere sahip binalar kullanarak elde ettikleri 8 farklı bina düzeni arasındaki çarpışma davranışını, binalar arasında deprem derzi bırakmayarak ve 5 farklı ivme kaydı için gerçekleştirdikleri deneylerde incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, rijit binaların iki binanın çarpışmasından ziyade sıralı çarpışmalardan her zaman daha fazla etkilendiğini, literatürün aksine rijit binaların sıralı çarpışmalarda ortada bulunmasının bina tepkisini azaltmadığını, rijit binalarda çarpışma hasarı düzeylerinin binanın konumuna değil de sadece periyoduna bağlı olduğunu ve literatürün aksine aynı yüksekliğe sahip sıralı komşu binalarda ortadaki binanın çarpışmadan daha az etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca çarpışmanın dikkate alınmadığı deneylerde maksimum yer değiştirmenin elde edildiği yer hareketinde, çarpışmanın dikkate alınması durumunda binalarda daha küçük tepkilerin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun en büyük yer değiştirmeye sebep olan yer hareketinin, daha yüksek çarpışma hızı üretmesine ve bu yüksek çarpışma hızının daha fazla enerji tüketimi sağlamasına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 1.4. Khawwaja ve Chouh (2013) tarafından benimsenen deney düzeneği

Khawwaja vd. (2013), 5 farklı yer hareketi için gerçekleştirdiği deneyler sonucunda elde ettiği deplasman değerlerini kullanarak analitik çalışmalar için literatürde bulunan yöntemlerde gerekli olan kontak eleman rijitliklerini ve doğrulama katsayılarını elde etmeye

ve hangi çarpışma modelinin daha doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymaya çalışmışlardır. Çalışmanın analitik kısmında, lineer viskoelastik yay modelini, geliştirilmiş lineer viskoelastik yay modelini (Kelvin model), lineer olmayan viskoelastik yay modelini, Hertz damp modelini ve geliştirilmiş Hertz damp modelini kullanmışlardır. Kontak eleman rijitliklerini ve doğrulama katsayılarını sarkaç deneyleri ile hesaplamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucu Hertz damp modelinin deneysel verilerden ve diğer çarpışma modellerinden daha yüksek sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca diğer dört çarpışma modelinin deney verileri ile benzer sonuçlar verdiğini ve analitik çalışmalarda uygulama kolaylığı ve güvenli sonuçlar vermesi sebebiyle lineer viskoelastik yay modelinin kullanılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

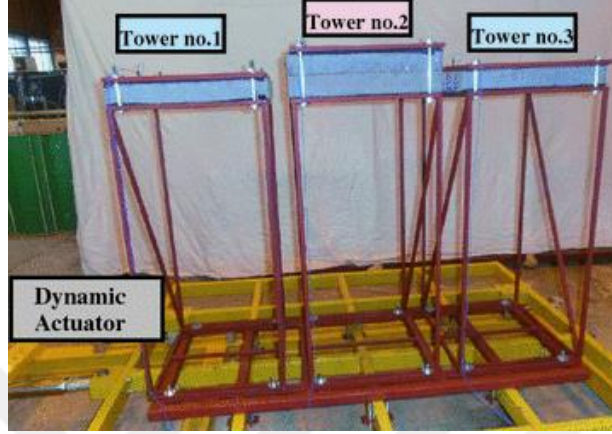
Khawwaja vd. (2014), farklı mesnet türlerinin yapıların çarpışma davranışı üzerine etkilerini sarkaç deneyleri kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, üç farklı mesnetlenme türü iki çelik kiriş kullanılarak incelenmiştir. Farklı mesnet türleri olarak, iki kirişinde kablolar ile bağlanması, bir kirişin kablo diğerinin kolon ile teşkil edilmesi ve iki kirişinde kolon ile teşkil edilmesi durumlarını dikkate almışlardır. Deney numuneleri arasındaki çarpışma davranışlarını incelemek için analitik çalışmalarında lineer olmayan viskoelastik modelini ve Hertz damp modelini kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, en büyük çarpışma katsayıları iki kirişinde kablolar ile bağlanması durumunda elde edilirken, en küçük çarpışma katsayıları iki kirişinde kolon ile teşkil edilmesi durumunda elde etmişlerdir. Ayrıca analitik çalışmalarda kullandıkları iki farklı çarpışma modelinin birbirine yakın sonuçlar verdiğini ancak deney sonuçları ile tamamen aynı sonuçları vermediğini özellikle iki kirişinde kolon ile teşkil edilmesi durumunda analitik modellerden elde edilen ivmelerin deneysel sonuçlar ile elde edilen ivmelerden çok büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun, literatürde yaygın olarak kullanılan lineer olmayan viskoelastik ve Hertz damp çarpışma modellerinin sistemlerin bağıllık durumlarını göz önüne alamamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

El-Khoriby vd. (2015), ikiden fazla bina arasında meydana gelen çarpışma davranışını incelemek için, esnek ve rijit binalarda çeşitli boşluk oranları ve yapı düzenleri dikkate alarak sıralı üç bina için küçük ölçekli sarsma masası deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.5). Deneyler sırasında, diğerlerine göre daha rijit binanın ortada bulunması ve daha esnek binanın orta bulunması durumu olmak üzere iki farklı yapı düzeni oluşturmuşlardır. Deneyler sonucunda binalar arasında hiç boşluk bırakılmaması durumunda başlangıçta binaların tek bir bina gibi birlikte çalışarak salınım yaptığını, daha sonra meydana gelen

çarpışmalar sebebiyle bu ortak salınının bozulduğunu tespit etmişlerdir. Binalar arasında hiç boşluk bırakılmadığı deneyler için ortada rijit binanın bulunduğu yapısal düzende meydana gelen ivme değerinin çarpışmanın dikkate alınmaması durumunda meydana gelen ivme değerinden %135.0 daha fazla olduğunu, ortada esnek binanın bulunması durumunda ise bu değer %5.00 ile %15.00 arasında arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumu şu şekilde açıklamışlardır: ortada rijit kenarlarda esnek binalar bulunması durumunda kenarda bulunan esnek binaların hareket etmeleri sınırlandırılmadığı için fazla yer değiştirme yapabilmektedir. Fazla yer değiştirme sebebiyle oluşan fazla hız çarpışma kuvvetini artırmaktadır. Öte yandan, ortada esnek kenarlarda rijit yapıların bulunması durumunda kenarlardaki rijit binaların hareket etmeleri sınırlandırılmamasına rağmen rijitlikleri sebebiyle az yer değiştirme yaptıklarını bu sebeple oluşan daha küçük hız değerlerinin daha az çarpışma kuvveti meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Binalar arasında 40.00mm boşluk bırakıldığı deneyler için ortada rijit binanın bulunduğu yapısal düzende rijit binada meydana gelen ivme değerinin çarpışmanın dikkate alınmaması durumunda meydana gelen ivme değerinden %794.0 daha fazla olduğunu, kenarlardaki esnek binalarda ise bu değer %397.0 ile %265.0 arttığını tespit etmişlerdir. Ortada esnek binanın bulunduğu yapısal düzende esnek binada meydana gelen ivme değerinin çarpışmanın dikkate alınmaması durumunda meydana gelen ivme değerinden %300.0 daha fazla olduğunu, kenarlardaki rijit binalarda ise bu değer %202.0 arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada sonucunda, sıralı binaların çarpışması durumunda rijit binaların esnek binaların hareketini sınırlaması sebebiyle esnek binalara oranla çarpışmadan daha fazla etkilendiğini, binalar arasındaki boşluk miktarının artırılmasının bina tepkilerini bazen artırdığını bazen de azalttığını, binalar için optimum boşluk oranının ya çarpışmayı tamamen önleyecek kadar büyük olması gerektiğini yada hiç boşluk bırakılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Jiang vd. (2022), bitişik çok katlı binalar arasındaki deprem kaynaklı çarpışma etkileri üzerine bir takım deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu amaçla 1/3 ölçekli 2 katlı ve 3 katlı çelik taşıyıcı sisteme sahip üç bina üzerinde sarsma masası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Döşeme-döşeme çarpışması, döşeme-kolon çarpışması ve eksantrik çarpışma türlerini deneysel olarak ele almışlardır. Deneyler sonucunda, çarpışmanın dikkate alındığı ve alınmadığı durumda elde edilen verileri kıyaslayarak çarpışma etkilerinin yapısal tepkilerde çok daha yüksek frekans içeriklerine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Döşeme-döşeme çarpışmasında, kolon-döşeme çarpışmasına kıyasla daha büyük çarpışma kuvvetlerinin ortaya çıktığını ifade etmişlerdir. Benzer şekilde döşeme-döşeme çarpışmasının diğer

Çarpışma türlerine kıyasla kat ivmelerini önemli derecede artırdığını rapor etmişlerdir. Son olarak, eksantrik çarpışmanın taban kesme kuvvetleri ve yer değiştirme tepkileri üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir.



şekil 1.5. El-Khoriby vd. (2015) tarafından sıralı binaların çarpışmasının incelendiği numuneler

Miari ve Jankowski (2022a), zemin türünün çarpışan yapıların davranışı üzerindeki etkisini sarsma masası deneyleri ile araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı dinamik karakteristiklere sahip küçük ölçekli tek katlı  elik bina modelleri kullanmışlardır (şekil 1.6). Deneylerde çarpışmanın olmadığı ve farklı derz boşluklarında (0.5cm, 1.0cm ve 1.5cm)  arpışmanın gerçekleştiği durumları dikkate almışlardır. İlk olarak, çarpışmanın dikkate alınan her iki yapı üzerindeki etkisini ele almışlardır. Ardından, derz mesafelerinin çarpışma davranışı ve yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında son olarak, zemin türünün çarpışmaya maruz kalan deney numunelerinin tepkileri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ASCE 7-10 yönetmeliğinde tanımlanan beş farklı zemin türünü dikkate almışlardır. Deneyler sonucunda çarpışmanın en b   k ivmeyi ve tüm titreşim süresi boyunca yapıların ivmelerini önemli ölçüde artırdığını ifade etmişlerdir. Çarpışmanın rijit yapıya kıyasla esnek yapı için daha kritik sonuçlar doğuracağını ortaya koymuşlardır. Deneylerde dikkate aldıkları parametrelerden biri olan derz miktarının çarpışan yapıların ivme tepkileri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu ve çarpışmaları tamamen ortadan kaldıracak kadar b   k olmadıkça, daha b   k derz miktarlarının daha küçük yapısal tepkilere neden olmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca zemin türünün çarpışan

yapıların tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve zemin türünün yapısal davranıştaki etkisinin çarpışma esnasında daha belirgin olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 1.6. Miari ve Jankowski (2022a) tarafından çarpışma deneyleri için kullan çelik çerçeveler

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda, komşu binalar arasındaki çarpışma etkileri sarsma masası deneyleri ele alınmıştır. Ancak köprü tabliyelerindeki genleşme derzlerinde de çarpışmaların meydana gelebildiği ve bunların yıkıcı etkilere neden olabileceği geçmiş çalışmalarda görülmüştür. Bu amaçla araştırmacılar köprü derzleri arasındaki çarpışma etkilerinin deneysel yöntemlerle araştırıldığı bazı çalışmalar yürütmüşlerdir.

Li vd. (2012), birbirine komşu üç segmentten oluşan köprü tabliyeleri arasında ki çarpışma davranışını, değişerek yayılan yer hareketi etkisini de göz önüne alarak incelemişlerdir. Bu çalışma için üç adet küçük boyutlu sarsma masası kullanmışlardır. Değişerek yayılan yer hareketi için dalga gecikme etkisini ve zemin etkisini dikkate almışlardır. Değişerek yayılan yer hareketi kullanılması durumunda köprü tabliyeleri arasında gerekli olan boşluk miktarının, üniform yer hareketi kullanılması durumunda gerekli olan boşluk miktarından %20 daha fazla olduğunu ve bu durumun köprü girişlerinin faz dışı (out of phase) hareket etmesine ve beklenmedik hasarların oluşmasına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca birçok yönetmelikte köprü segmentleri arasındaki çarpışmayı önlemek için segmentlerin benzer frekansta seçilmesi yöntemiyle hesaplanan boşluk oranının, gerçekte depremin değişerek yayılması nedeniyle yetersiz olabileceğini tespit etmişlerdir.

Guo vd. (2012), yaptıkları deneysel çalışmada şekil hafızalı alaşım mesnet tellerin kullanarak karayolu köprülerindeki çarpışma ve düşme düşmesi (unseating) etkilerini azaltmaya çalışmışlardır. Sarsma masası deneylerinde her birinin ağırlığı yaklaşık 2.50ton olan 1/20 ölçekte iki köprü tabliyesi ve iki farklı düzende şekil hafızalı alaşım mesnet teli kullanmışlardır. Deneylerde tek bir sarsma masası kullanılması ve her iki tabliyenin de aynı özelliklere sahip olması nedeniyle çarpışma davranışını elde etmek için tabliyeler ile köprü ayakları arasında farklı yatay rijitliklere sahip kauçuk izolatörler kullanmışlardır. Deneylerde geçmişte meydana gelmiş 3 farklı depreme ait ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, geleneksel sınırlayıcıların aksine şekil hafızalı alaşım mesnet telleri sadece döşemelerin düşmesini önlemek için değil aynı zamanda çarpışmayı önlemek içinde etkili olduğunu, her iki köprü segmentinin frekanslarının birbirine yakın olması durumunda tabliyeden tabliyeye teşkil edilen şekil hafızalı alaşım mesnet tellerinin döşemelerin düşmesini önlemek için iyi performans göstermediğini, tabliye ile köprü ayağı arasına yerleştirilen şekil hafızalı alaşım mesnet tellerinin yer değiştirmeleri ve çarpışmaları azalttığını tespit etmişlerdir.

Li vd. (2019), boyuna doğrultuda eğime sahip kavisli köprülerde çarpışma etkilerini ele almışlardır. Bu amaçla küçük yarıçapa sahip 1/10 ölçekli bir kavisli köprü modeli inşa etmişlerdir. Deney sonucunda, bitişik tabliyeler arasındaki çarpma tepkilerinin, yer hareketi durumundan önemli ölçüde etkilendiğini ve çift yönlü uyarma altındaki en büyük çarpışma kuvvetlerinin, tek yönlü uyarma altındakilerden önemli ölçüde daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Çarpışma sıklığının derz mesafesindeki artışla azalırken, en büyük çarpışma kuvvetinin derz mesafesindeki değişikliklerle tutarsız olduğunu ve büyük derz mesafelerinin büyük çarpışma kuvvetlerine neden olabileceğini ifade etmişlerdir.

Jiao vd. (2021), bitişik tabliyeler arasındaki çarpışmanın kavisli köprülerin sismik tepkisi üzerindeki etkisini araştırmak için 1/25 ölçekli bir model üzerinde bir sarsma masası deneyi tasarlamış ve gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, aralarında genleşme derzi olan iki kavisli köprü dikkate almışlardır. Deneylerde yer hareketi olarak darbe etkileri içeren yakın-fay, darbe etkileri içermeyen yakın-fay ve uzak-fay ivme kayıtları kullanmışlardır. Testler sonucunda, çarpışmanın sıklıkla tabliye köşelerinde meydana geldiği ve temas yüzeyi boyunca üniform olmadığı bulmuşlardır. Bu çarpışmanın, köprülerin genel yer değiştirme taleplerini önemli ölçüde artırabileceğini ve büyük düzlem içi dönmelere neden olabileceğini ortaya koymuşlardır. En büyük toplam çarpışma kuvvetlerinin, derz mesafesinin 1 mm'den 2 mm'ye yükselince arttığını ancak mesafenin 2 mm'den 4 mm'ye çıkması ile azaldığını ifade

etmişlerdir. Maksimum düzlem içi dönmelerin ise, yer hareketinden bağımsız olarak artan derz mesafesiyle azaldığını göstermişlerdir. Darbe etkileri içeren yakın fay yer hareketlerinin içermeyenlere kıyasla kavisli köprülerde daha büyük yapısal tepkilere neden olduğunun altını çizmişlerdir.

1.2.2. Analitik ve Sayısal Çalışmaları İçeren Literatür Taraması

Anagnostopoulos ve Spiliopoulos (1992), aynı sırada ikiden fazla binanın çarpışma analizlerini gerçekleştirmiştir. Çarpışmayı viskoelastik eleman kullanarak ifade etmişlerdir. Sıralı binaların kütlelerinin aynı olması durumunda, rijit binanın çarpışma davranışına etkisinin hafif binaya göre daha fazla olacağını, sıralı binaların kütlelerinin birbirinden çok farklı olması durumunda hafif binanın çarpışmadan daha çok etkileneceğini ifade etmişlerdir.

Ohta vd. (2006), aynı sırada iki ve üç bina arasındaki çarpışma davranışını, rijitlik, kütle ve bina yüksekliğini değişken olarak kullanarak incelemiştir. Binalar arasındaki çarpışmayı, Hertz modeli ile temsil etmişlerdir. Aynı sırada üç yapının çarpışması durumunda, iki binanın çarpışması durumuna göre çarpışma etkilerinin oldukça arttığını ifade etmişlerdir.

Jankowski (2009), 1971 San Fernando depreminde çarpışma nedeniyle hasar görmüş bir hastane binasının ve hastane binasından derz ile ayrılmış merdiven kulesinin çarpışma analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, hastane binasından daha hafif olan merdiven kulesinin çarpışmadan oldukça fazla etkilendiğini ifade etmiştir. Bunun bir sonucu olarak hafif ve ağır binaların çarpışmasında, hafif binanın çarpışma durumunda ciddi hasarlar alabileceğini, ağır olan binanın ise çarpışmadan daha az etkilendiğini ifade etmiştir.

Cui vd. (2011), çarpışmayı temsil etmek için kullanılan modellerden biri olan Hertz-damper modeli için çarpışma yüzeylerinin düz olması durumunda çarpışma rijitliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Buldukları çarpışma rijitliklerinin doğruluğunu ispatlamak için bir köprü modeli üzerinde çeşitli çarpışma modelleri kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir ve analizler sonucunda belirlenen rijitliklerin çarpışmayı temsil etmekte oldukça etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Jankowski (2012), 1971 San Fernando depreminde çarpışma nedeniyle hasar görmüş bir hastane binasının ve hastane binasından derz ile ayrılmış merdiven kulesinin çarpışma analizlerini hem üniform yer hareketi hem de değişerek yayılan yer hareketi etkilerini

dikkate alarak gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda değişerek yayılan yer hareketinin binaların çarpışma davranışlarını ciddi oranda etkilediğini ifade etmiştir.

Rajaram ve Kumar (2012), çeşitli periyot değerlerine sahip komşu binalar için dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bazı yönetmeliklere göre belirledikleri boşluk oranları için zaman tanım alanında analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda FEMA 273-1997 ve NBC PeruE030-2003 yönetmeliklerinin diğer yönetmeliklere göre daha büyük derz mesafeleri önerdiğini, seçilen depremin özelliklerine bağlı olarak yönetmeliklerin önerdiği boşluk oranlarının yetersiz olabileceğini tespit etmişlerdir.

Yaghmaei-Sabegh ve Jalali-Milani (2012), yakın ve uzak fay yer hareketi için yapı periyodunun bir fonksiyonu olarak çarpışma kuvveti spektrumu oluşturmuşlardır. Analizlerde yapı olarak tek serbestlik dereceli sistemler, çarpışma modeli olarak lineer olmayan viskoelastik modeli, değişken olarak kütle ve sönüm oranlarını kullanmışlardır. Elde ettikleri çarpışma kuvveti spektrumunun komşu binaların tasarımı için oldukça uygun bir araç olduğunu ifade etmişlerdir.

Efraimiadou vd. (2013), geri çekme düzensizliğine sahip 8 ve 5 katlı betonarme binalardan oluşturdukları 9 farklı çarpışma düzeni için 6 yer hareketi kaydı kullanarak çarpışma analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çarpışma etkilerini, maksimum yer değiştirmeler, kalıcı yer değiştirmeler, taşıyıcı sistem elemanlarının sünekliği, iç kuvvetler ve görelî kat ötelenmelerini karşılaştırarak incelemişlerdir. Analizler sonucunda, çarpışmanın nadir de olsa yapı davranışını olumlu etkilediği ancak çoğu durumda kesit tesirleri ve kat kuvvetlerini artırdığını ortaya koymuşlardır.

Raheem (2013), 9 farklı ivme kaydı kullanarak gerçekleştirdiği analitik çalışmada, binalar arasındaki çarpışmayı hem lineer hem de lineer olmayan çarpışma elemanlarıyla temsil etmiştir. Bunun yanında çeşitli boşluk oranları ve binalar arasında çarpışma etkilerini azaltacak elemanlar kullanarak çarpışma analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda, binalar arasındaki çarpışmanın dikkate alındığı durumda elde edilen kat ivmesi ve kat kesme kuvvetlerinin, çarpışmanın dikkate alınmadığı durumdaki değerlerden oldukça büyük olduğunu ve binalar arasında kullanılan sönüm elemanlarının çarpışma etkilerini azaltmada oldukça efektif olduğunu tespit etmiştir.

İnel vd. (2015), aynı sırada iki ve üç binanın bulunduğu durumlar için çarpışma etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)'te verilen boşluk miktarının çoğu durumda yetersiz

olduğunu ve yapı performansı değerlendirilirken çarpışma etkilerinin göz ardı edilmemesi gerektiğini tespit etmişlerdir.

Pala vd. (2015), yumuşak kat düzensizliğine sahip yapıların çarpışma davranışlarını, analizlerde binalar arasında çeşitli derz miktarlarını dikkate alarak incelemişlerdir. Analizler sonucunda, yumuşak kat düzensizliğinin çarpışma etkilerini artırabileceğini tespit etmişlerdir.

Polycarpou vd. (2015), çarpışmanın dikkate alındığı ve alınmadığı komşu binalarda deprem geliş açısının yapısal davranışa olan etkilerini araştırmak amacıyla sayısal simülasyon ve parametrik çalışmalar yürütmüşlerdir. Parametrik çalışma sonucunda, özellikle çarpışma gerçekleştiği durumlarda yer hareketi açısının dikkate alınmasının oldukça önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Yer hareketinin açısı ve eksantirisiteden en çok etkilenen yapısal tepkinin göreceli kat ötelenmelerinin olduğunu ve durumun özellikle daha esnek ve yüksek binalarda görüldüğünü ortaya koymuşlardır.

Crozet vd. (2017) komşu binaların yapısal tepkilerinin yapısal ve deprem parametrelerine bağlı olarak değişimini incelemişlerdir. Bu amaçla Monte Carlo simülasyonları ile kapsamlı duyarlılık analizleri gerçekleştirmişlerdir. Duyarlılık analizleri ile boyutsuz ana uyarım frekansı, yapıların kütle ve frekans oranları ve geri sıçrama katsayısı gibi parametrelerin göreceli öneminin tutarlı bir ölçüsünü sağlayan duyarlılık indekslerini hesaplamışlardır. Ayrıca, çarpışan yapıların doğrusal olmayan davranışlarının etkisini de dikkate almışlardır. Çarpışmanın dikkate alındığı ve alınmadığı durumda elde edilen tepkiler kıyaslanarak, çarpışmanın maksimum kuvvetler ve doğrusal olmayan talepte meydana getirdiği artışları analiz etmişlerdir.

Elwardany vd. (2017), dolgu duvarların ikiden fazla bina arasında gerçekleşen çarpışma türü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dolgu duvar katkısını, eşdeğer diyagonal çubuklar kullanarak simüle etmişlerdir. Analizler sonucunda, dolgu duvarların yapıların sismik davranışını önemli ölçüde değiştirebileceğini ve sismik uyarım nedeniyle meydana gelen çarpışmaların yapısal davranış üzerinde ciddi bir etkiye sahip olabileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, dolgu duvarların yapı boyunca dağılımının yapısal davranış üzerinde kritik etkilerinin olabileceği vurgulamışlardır.

Favvata (2017), betonarme yapıların sismik performansını derz mesafeleri ile ilişkilendirmeye çalışmıştır. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasında en önemli olgunun kısa binanın en üst katıyla etkileşimde olan yüksek binanın dış kolonları olduğunu, bu kolonların kesme kuvvetleri nedeniyle her zaman kritik durumda olduğunu ve etkileşimin

kolonların performansını önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Daha sonra, bitişik yapılar arasındaki çarpışmaya karşı gereken minimum derz mesafesini, çarpışmaya maruz kalan kritik kolonun kesme nedeniyle gevrek göçmesinin önlenmesi ve bitişik yapılar arasındaki temasın tamamen önlenmesi açısından tahmin etmeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda bahsedilen durumlar için belirlenen derz mesafelerini Eurocode-8 hükümleri ile kıyaslamış ve Eurocode-8 hükümlerine göre belirlenen mesafelerin daha konservatif olduğunu ifade etmişlerdir.

Ghandil ve Aldaikh (2017), yumuşak zemin üzerinde oturan simetrik plana sahip komşu binalar arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Yapı-zemin etkileşimi ve ankastre mesnet koşulları dikkate alarak gerçekleştirdikleri çalışmada çarpışmanın önlenmesi için gerekli olan minimum derz mesafesinin belirlenmesi ve çarpışma etkilerinin yapısal hasar üzerindeki etkileri konularına odaklanmışlardır. Komşu binalarda çarpışmaların önlenmesi açısından, International Building Code 2009'da verilen derz mesafelerinin en az üç katı katı boşluk oranının dikkate alınmasının gerektiğini ifade etmişlerdir. Yönetmelik koşullarına bağlı olarak bırakılan mesafelerde, komşu binaların ciddi çarpışma etkilerine maruz kaldığı ve bu nedenle kat kesme kuvvetlerinde ve hasar endekslerinde önemli farklılıkların oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Köksal ve Karaca (2017), komşu binaların çekiçleme davranışını patlatma kaynaklı yer hareketleri kullanarak araştırmışlardır ve depremin yanı sıra patlatma etkilerinin de derz miktarlarının hesabında göz önüne alınmasının gerektiğini ifade etmişlerdir.

Pala ve Tekin (2017), aralarında yeterli boşluk bulunmayan ve zayıf kat düzensizliğine sahip komşu binaların çarpışma davranışlarını incelemişlerdir. Zayıf kat düzensizliğinin olduğu durumlarda meydana gelen çarpışma kuvvetlerinin genellikle düzensizliğin olmadığı durumlardan daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir.

Sak ve Beyen (2017), yaptıkları çalışmada DBYBHY-2007'de verilen derz miktarlarının yeterli olduğunu, komşu binalar arasında yeterli boşluk bırakılmaması durumunda hedef performans seviyelerinin sağlanmadığını tespit etmişlerdir.

Karayannis ve Naoum (2018), yaptıkları çalışmada sınırlı çarpışma yüzeyi sebebiyle oluşan burulma etkilerini, döşeme-döşeme çarpışma durumu ve döşeme-kolon çarpışması durumu için incelemişlerdir. Çeşitli kat sayısı ve deprem kaydı için 200'den fazla analiz gerçekleştirmişlerdir. Sınırlı çarpışma yüzeyinin binalarda büyük burulma momentine neden olduğunu, çarpışmanın meydana getirdiği kesme kuvvetlerinin taşıyıcı sistem elemanlarının

kapasitelerini ciddi oranda aştığını ve bu kesme kuvvetlerinin olası depremlerde binanın ciddi hasarlara neden olabileceğini tespit etmişlerdir.

Kamal vd. (2018), düşük ve orta katlı mevcut yapıların sismik performanslarını çarpışma etkilerini de göz önüne alarak incelemişlerdir. Çarpışmanın binaların davranışlarını önemli ölçüde etkilediğini ve çarpışma etkilerinin dikkate alınmadan yapıların performanslarının uygun bir şekilde değerlendirilmesinin mümkün olmadığını ifade etmişlerdir.

Farahani vd. (2019), eksantrik çarpışma türünü, farklı derz mesafeleri, kat yükseklikleri, binaların plan boyutunun %0.00 ile %30.00 arasında değişen eksantirisite oranları dikkate alarak incelemişlerdir. Analizler sonucunda, çarpışma kuvvetleri, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve plastik dönmeleri karşılaştırma parametreleri olarak dikkate almış ve böylece daha büyük eksantirisite oranlarının çarpışma etkilerini ne derece değiştirdiğini ve tasarım yönetmeliklerinin sunduğu derz mesafelerinin yetersizliklerini tartışmışlardır. Eksantirisite kaynaklı burulmanın ve çarpışmanın birleşik etkilerinin, yapılarda doğrusal olmayan tepkileri artırdığını ifade etmişlerdir.

Çaycı ve Akpınar (2021), gerçekleştirdikleri analizler sonucunda binalardaki yer değiştirme talebinin çarpışma yönünde azalma ve serbest yönde artma eğiliminde olduğunu ve maksimum görelî kat ötelemesi oranının çoğu durumda çarpışma etkisiyle arttığını ifade etmişlerdir. Öte yandan, çarpışmanın komşu binaların hasar mekanizmasını etkilediğini ve plastik dönme taleplerinin giriş ve kolon elemanları arasında değiştiği bulmuşlardır.

Hosseini vd. (2022), komşu betonarme binalardaki hasarları tespit etmek amacıyla çarpışma etkilerini dikkate alarak üç farklı hasar indeksini kullanmışlardır. Bu amaçla çeşitli oranlarda derz boşluk oranları ve farklı kat yükseklikleri dikkate almışlardır. Bu yapıları, 44 uzak-fay yer hareketi kaydı altında artımlı dinamik analiz yöntemi kullanılarak analiz etmişlerdir. Çarpışmanın olduğu ve olmadığı durumda ki sonuçları kıyaslayarak, komşu binalar arasındaki etkileşimin doğrusal olmayan hasarı daha düşük sismik şiddette meydana getirebileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, çarpışma nedeniyle, az katlı yapıların yüksek katlı yapılara kıyasla daha fazla hasar gördüğünü ve yüksek hasar indeksi değerlerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Kamal vd. (2022), yumuşak zemin üzerine oturan orta katlı betonarme binalarda yapı-zemin-yapı etkileşimi, zemin-yapı etkileşimi ve ankastre mesnet varsayımlarının sismik davranış üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Süneklik düzeyi yüksek çeşitli kat sayılarına sahip üç boyutlu betonarme bina modelleri dikkate almışlardır. Gerçekleştirdikleri çok

sayıda analiz sonucunda, yumuşak zemine oturan binalarda komşu binaların birbirlerini etkilediğini ve binaların tek başlarına değerlendirilmemesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, komşu binalar arasındaki derz mesafeleri yetersizse ve çarpışma potansiyelleri varsa, bina yüksekliğinden bağımsız olarak zemin-yapı etkileşimi ile komşu bina etkilerinin dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kamal ve İnel (2022b), düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda zemin türünün minimum derz mesafesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve binalar arasında bırakılması gereken derz miktarının hesabında kullanılacak yeni bir denklem önermişlerdir. Farklı zemin türleri, farklı deprem kayıtları ve farklı bina çiftleri kullanılarak toplamda 3696 doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada önerilen yeni denklemin, düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda çarpışmaları önlemek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Mazza ve Labernarda (2022), planda L şekline sahip ankastre ve temel yalıtımlı betonarme komşu binaları T ve C şekilli farklı konfigürasyonlarda yerleştirerek çarpışma etkilerini araştırmışlardır. Analizler neticesinde yer hareketi özelliklerinin çarpma etkileri ve burulma talepleri üzerinde önemli etkilerinin olduğunu, tasarım sırasında kullanılan yönetmelik koşullarınca dikkate alınan derz mesafelerinin yetersiz olabildiğini ve bu derz mesafelerine kıyasla büyük göreceli yer değiştirmelerin meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir.

Miari ve Jankowski (2022b), zemin türünün kolon-döşeme çarpışmasının gerçekleştiği binalarda yapısal davranışa olan etkisini araştırmışlardır. Analizler sonucunda çarpışmanın, dikkate alınan tüm durumlar için çarpışmaya maruz kalan kolonlarda kesme talebini artırdığı ve zemin sınıfı kötüleştikçe bu artışın daha da belirgin olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca çarpışma nedeniyle etkileşimin olduğu kolonlarda kesme kapasitesinin önemli ölçüde aşıldığı ve dolayısıyla çarpışmanın kolonlarda gevrek göçmeye neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

1.2.3. Çarpışma Etkilerini Azaltmak Amacıyla Gerçekleştirilen Çalışmalar

1.2.3.1. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Taraması

Komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için farklı malzemeler ve yöntemler kullanılarak geçmiş yıllarda bir takım deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu

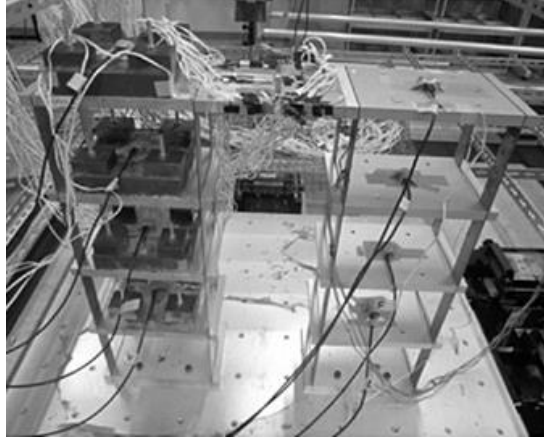
çalışmalarda genellikle komşu binaların çarpışma bölgelerinde polistiren (strafor) veya polimer malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda ise viskoz sönümleyiciler çarpışma bölgelerine teşkil edilmiştir. Ancak bu çalışmalarda kullanılan yapıların genellikle kayma erevesi olarak dikkate alındığı görülmektedir. Bu durumda gerçek yapıların rijitlik ve kütlelerine oranla çok küçük rijitlik ve kütlelerin dikkate alınması nedeniyle ölçüm sonuçları yeteri kadar güvenilir olmamaktadır (Jankowski, 2010).

Rezavani ve Moghamad (2004), harmonik ve gerçek deprem yüklerine maruz bıraktıkları küçük ölçekli (yaklaşık 1/10), biri 3 diğeri 6 katlı ve tek açıklıklı olan iki boyutlu çerçevelerin çarpışma deneylerini sarsma masası üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyin ilk aşamasında değişken olarak çerçeveler arasında çeşitli boşluk miktarları bırakmışlardır. İkinci aşamada ise çarpışma etkilerini azaltmak üzere olası çarpışma noktalarına polistiren (strafor) malzeme teşkil etmişlerdir. Deneyler sonrası, çarpışma kuvvetini sönümlemek amacıyla sisteme yerleştirilen polistiren malzemenin ölçülen ivme ve yer değiştirme değerlerini oldukça azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca ereveler arasında bırakılan boşluk miktarının artırılması sonucu, çerçevelerde ölçülen tepkilerin de artırdığını ortaya koymuşlardır.

Salem ve Feng (2008), yaptıkları deneysel çalışmada biri rijit diğeri esnek elik binalar arasında meydana gelecek çarpışmanın etkilerini azaltmak için deneylerde iki farklı viskoz sönümleyici kullanmışlardır. Viskoz sönümleyicilerden biri sabit sönüm oranı için hem çekmeye hem basınca çalışırken, diğer sönümleyici farklı sönüm oranları için sadece basınca çalışmaktadır. Deneylerde, 1/6 lekli ve tek açıklıklı elik yapılar kullanılmış olup rijit bina 3 katlı, esnek bina ise 8 katlıdır. Bu sebeple, literatürde çarpışma üzerine yapılmış az sayıda büyük ölçekli çalışmalardan biridir. Deneyler sırasında her bir katta ivme ve deplasman ölçümlerinin yanı sıra çarpışma kuvvetlerinin elde edilebilmesi için tek bir noktada yk hücresi kullanmışlardır. Çalışmada, bazı deprem kayıtları için binalar arasında hiç boşluk bırakılmaması durumunda elde edilen ivme değerlerinin, küçük boşluklar bırakılması durumunda elde edilen ivme değerinden oldukça büyük olduğunu, binalar arasına yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin çarpışmanın olumsuz etkilerini büyük oranda azalttığını, viskoz sönümleyicilerin, özellikle şiddetli yer hareketlerinde ve hiç boşluk bırakılmayan binalardan ziyade küçük de olsa aralarında boşluk bırakılan binalarda daha etkili çalıştığını tespit etmişlerdir.

Takabatake vd. (2014), küçük ve orta katlı binalar arasında olası çarpışma durumlarında oluşacak hasarları azaltmak için kauçuk benzeri malzemeler kullanarak küçük

ölçekli deneyler gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.7). Bunun yanı sıra şok sönümleyici kauçuk malzemenin analitik olarak ifade edilebilmesi için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde biri diğerine göre ağır binalar arasındaki çarpışmayı 2, 5 ve 7 mm boşluklar dikkate alarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda yapı elemanlarında oluşan şekil değiştirmelerin şok sönümleyici kauçuk sayesinde yaklaşık 64 kat küçüldüğünü, yapılar arasındaki mesafenin azalmasıyla çarpışma kuvvetlerinin arttığını, kullanılan şok sönümleyici kauçuk sayesinde çarpışma kuvvetlerinin yaklaşık 30 kat azaldığını tespit etmişlerdir. Kullanılan bu kauçuk malzemenin sertliğinin fazla olması durumunda çarpışma kuvvetlerinin darbe benzeri özelliklerde geliştiğini, yumuşak özelliklerde olması durumunda ise darbe benzeri özelliklerin azaldığını ve çarpışma kuvvetinin zamana yayıldığını tespit etmişlerdir. Deneyler sırasında çarpışma kuvvetlerini gerinim ölçerler ve ivmeölçerler kullanarak hesaplamışlardır. Ancak gerinim ölçerler kullanılarak hesaplanan çarpışma kuvveti değerlerinin ivmeölçer kullanılarak hesaplanan değerlerden yaklaşık 4 kat daha büyük olduğunu ve gerinim ölçerlerin çarpışma bölgesine yakın yerleştirilmesi sebebiyle ivmeölçerlerden elde edilen çarpışma kuvveti değerlerinin daha güvenli sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 1.7. Takabatake vd. (2014) tarafından çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen testlere ait görsel

Soltysik vd. (2017), gerçekleştirdikleri küçük ölçekli sarsma masası deneylerinde binalar arasında meydana gelen çarpışma etkilerini azaltmak için etkileşim bölgelerinde polimer malzemeler kullanmışlardır. Çalışmada, küçük boyutlarda 3 farklı çelik çerçeve ve 4 farklı kalınlıkta polimer malzeme kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda kullanılan

polimer malzemenin kalınlığının artmasıyla çarpışma etkilerinin azaldığını, en küçük tepkilerin bütün boşluğun polimer malzemeler ile doldurulması durumunda elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Crozet vd. (2019), büyük ölçekli deney numuneleri ile gerçekleştirdikleri sarsma masası deneyleri ile literatürdeki sınırlı çalışmalardan birini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde birbirine komşu beton döşemeye ve çelik taşıyıcı sisteme sahip iki çelik bina kullanmışlardır. Döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı deneylerde binalardan biri diğerine kıyasla daha rijit olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Deneylerde çeşitli derz miktarlarını ve depremleri dikkate almışlardır. Binalar arasındaki etkileşimin neden olduğu tepkileri azaltmak amacıyla kat seviyelerinde iki yapıyı rijit elemanlarla birbirlerine bağlamışlardır. Çarpışmanın olmadığı sarsma masası deneylerine ait sonuçlar karşılaştırıldığında, rijit bağlantılar, dikkate alınan depremlerin çoğu için rijit yapının görelî kat ötelenmelerini önemli ölçüde artırdığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerde ise rijit yapının görelî kat ötelenmelerinde kayda değer bir artış meydana getirmeksizin esnek yapının görelî kat ötelenmelerini azalttığı için, döşeme seviyesindeki rijit bağlantılar faydalı olarak değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri bu sonucun çalışmada dikkate alınan binalar için geçerli olduğunu ve genel geçerliliğinin olmadığını da altını çizmişlerdir.

Komşu binalar arasındaki çarpışmalara ek olarak taban yalıtımı olan binalarda, yalıtılmış binanın taban yer değiştirmesi, tasarım sınırını aşabilmekte ve hendek duvarları veya bitişik binalarla yapısal ve yapısal olmayan hasara yol açabilen çarpışmalar meydana gelebilmektedir. Bu amaçla araştırmacılar yalıtımlı binalar ile hendek duvarları arasında kullanılabilecek sınırlandırıcılar için deneysel bazı çalışmalar yürütmüşlerdir. Andreus vd. (2017), taban yalıtımlı binalarda hendek duvarı ile çarpışma nedeniyle oluşabilecek yapısal tepkilerin azaltılması amacıyla iki tip tampon dikkate alarak sarsma masası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde farklı yer hareketleri, derz miktarları ve genlik değerleri kullanmışlardır. Genel amaçlı bir bilgisayar kodu kullanarak sistemin davranışını sayısal olarak simüle etmek için uygun bir model geliştirmişlerdir ve bunun deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlandığını ortaya koymuşlardır.

Du vd. (2021) ve Du vd. (2022), taban yalıtımı olan binalara yumuşak veya sert darbe mekanizmalarına sahip yer değiştirme sınırlama cihazlarının (sınırlayıcıların) uygulanabilirliğini ve etkinliğini sarsma masası deneyleri ile araştırmışlardır. Deneyleri, sekiz farklı tip yumuşak ve sert sınırlayıcıya sahip 1/6 ölçekli üç katlı bir deney numunesi

üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde sınırlayıcıların rijitliklerini, derz mesafelerini ve yer hareketi özelliklerini girdi parametreleri olarak dikkate alırken, çıktı parametreleri olarak taban yer değiştirmesini ve üst yapının dinamik tepkisini ele almışlardır. Test sonuçları, sınırlayıcı rijitliği ve derz boşluğunun uygun bir kombinasyonu ile üst yapıya büyük yapısal tepkiler iletilmeden, yalıtımlı binanın taban yer değiştirmelerinin etkili bir şekilde sınırlandırılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, görelî kat ötelemelerini ve üst yapı ivmelerini önemli ölçüde artırabilecekleri için rijit sınırlayıcılardan kaçınılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

1.2.3.2. Analitik ve Sayısal Çalışmaları İçeren Literatür Taraması

Licari vd. (2015), iki yapının akışkan-viskoz sönümleyiciler ile bağlanmasından oluşan sönümlü ara bağlantı elemanı önermişlerdir. Bu amaçla kalibrasyon için ilk olarak numerik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra mevcut bir yapı modeline bu yöntemi uygulayarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu güçlendirme stratejisinin faydalarını, gerçek koşullardaki yapısal tepkilerle de kıyaslayarak tartışmışlardır.

Turhan (2015), komşu binalar arasındaki çarpışmaların önlenmesi amacıyla viskoz sönümleyicilerin optimum yerleşimi üzerine çalışmalar yürütmüştür. Toplam sönüm katsayısındaki dikkate aldığı farklı değerler üzerinden optimizasyon gerçekleştirmiş ve çeşitli açılardan değerlendirmelerde bulunmuştur.

Abdeddaim vd. (2016), farklı dinamik özelliklere sahip on katlı iki düzlem bina modeli arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla binaları birbirlerine bir manyetoreolojik sönümleyici yardımıyla bağlanmışlardır. Bu sönümleyiciyi binaların en üst katına konumlandırmışlardır. Bu yöntemin, iki ayrı yapının sönümleme cihazı ile birleştirilmiş tek bir sistemmiş dikkate alınabileceğini ifade etmişlerdir. Bu yöntem ile ivme, yer değiştirme ve görelî kat ötelemelerinde azalmalar meydana geldiğini ve böylece çarpışma ihtimalinin azaltıldığını ifade etmişlerdir.

Jankowski ve Mahmoud (2016), farklı dinamik özelliklere sahip iki bitişik üç katlı binanın her kat seviyesinde bağlantı elemanları (yaylar, amortisörler veya viskoelastik elemanlar) ile bağlanması durumunda çarpışma etkilerini azaltmakta ki etkinliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yapıların ek bağlantı elemanları ile birleştirilmesinin daha hafif ve daha esnek bina için faydalı olabileceğini ve daha rijit binanın ise tepkilerinin önemli düzeyde değişmediğini göstermişlerdir. Ayrıca, farklı bağlantı elemanlarının

etkinlikleri karşılaştırılarak, viskoelastik elemanların kullanımının, yay ve amortisör elemanlarının tek başına uygulandığı duruma göre daha düşük rijitlik ve sönüm değerlerinde yapının tepe yer değiştirmesini azalttığı ortaya koymuşlardır.

Aydın vd. (2018), pasif sönümleyicilerden olan viskoz sönümleyicilerin komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmadaki ve önlemekteki rolü için uygulamaları incelenmişlerdir. Bu sönümleyicilerin yapısal davranışa etkisini araştırmak amacıyla farklı yüksekliğe sahip iki komşu bina dikkate alınmıştır. Çarpışma etkilerine ilişkin davranışların yorumlanması için yer değiştirme ve göreceli kat ötelemesi değerlerini karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Komşu betonarme binalar için viskoz sönümleyicilerin kullanımının depremler sırasında çarpışma etkilerini önlemek için yararlı ve faydalı olduğunu göstermişlerdir.

Güler (2018), gerçekleştirdiği çalışmalarda çarpışma bölgelerine neopren kauçuk elemanlar yerleştirilerek çarpışma etkilerini azaltmaya çalışmıştır. Bu elemanlara ait eksenel rijitlik değerlerinin hesabında mevcut ampirik formülden yararlanmıştır. Analizler sonucunda, bu kauçuk elemanların çekiçleme enerjisini ve diğer çarpışma etkilerini azaltılabileceğini ifade etmiştir.

He vd. (2018), kauçuk tamponların çarpışma etkilerini azaltmaktaki rolü üzerine araştırmalar yürütmüşlerdir. Tamponlu ve tamponsuz durumda elde ettikleri verileri kıyaslamışlardır ve sismik yükler altında çerçeve titreşim tepkilerini simüle etmek için farklı tipte çarpışma modelleri kullanmışlardır. Sonuçlar, polimer tamponların darbe kuvvetlerinin maksimum değerlerini azaltabildiğini ancak darbe sürelerini artırabildiğini göstermektedir. Tampon malzemelerinin viskoelastisitesinin, çarpışma kuvvetleri üzerinde belirli bir dizi etkiye sahip olduğunu ve uygun olmayan malzeme türlerinin ve çarpışma parametrelerinin seçilmesinin arzu edilmeyen sonuçlara yol açabileceğini ifade etmişlerdir.

Karabork ve Aydın (2019), farklı dinamik özelliklere sahip bitişik yapıların deprem etkisi altında çarpışmasını önlemek için yapılar arasında viskoz sönümleyiciler için yeni bir optimum yerleştirme yöntemini araştırmışlardır. Klasik, merdiven ve X-diyagonal model olmak üzere üç farklı tipte viskoz sönümleyici tasarımını, komşu iki bina modeli arasında çarpışmanın önlenmesi amacıyla yerleştirmişlerdir. Optimum sönümleyici yerleşimini bulmak için zaman tanım alanı analizlerini ve sayısal optimizasyon yöntemlerini içeren yeni bir algoritma önermişlerdir. Sönümleyici yerleştirme tipinin yapısal modeller üzerindeki etkileri, komşu binalara ait periyot değerlerinin kritik oranını, müsaade edilen göreceli yer değiştirme sınırını, mod davranışını ve sönümleyici üst sınırını el almışlardır. Analizler

sonucunda, önerilen yöntemin uygun sönümleyici yerleşiminin belirlenmesinde ve çarpışma etkilerinin ortadan kaldırmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Mazza ve Labernarda (2020), taban izolasyonuna sahip bir betonarme bina ile binanın içinde bulunan ankastre mesnetli asansör şaftı arasındaki çarpışma etkilerini incelemişlerdir. Elastomerik ve kayar mesnetli hibrit izolasyon sistemi ile izole edilen 4 katlı yapıda, izolasyon seviyesini çelik taşıyıcı sisteme sahip asansör şaftı kesmektedir. Bu iki taşıyıcı sistem arasında boşluk bulunmasına karşın çarpışma etkilerinin meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir ve yapısal çarpışma etkilerini azaltmak için, asansör şaftı ile bina arasında manyetik sönümlü bir bağlantı (MDL) önerilmişlerdir.

Elwardany vd. (2021), üç yapı arasındaki karşılıklı etkileşimi azaltmak için doğrusal ve doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyiciler kullanımının etkisini araştırmışlardır. Binalarda taşıyıcı sistem olarak çelik elemanları tercih etmişlerdir. Sonuçlar, doğrusal veya doğrusal olmayan sönümleyicilerin kullanılmasının, seri halindeki bitişik binaların tepkisini önemli ölçüde azaltabileceğini ve hemen hemen tüm katlarda performansta iyileşme sağlayabileceğini ifade etmişlerdir. Komşu binalar için doğrusal veya doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyiciler kullanılması durumunda, tasarımdan bağımsız kuvvetin sırasıyla 6.20 veya 1.90 katı maksimum kuvvete dayanacak şekilde tasarlanması gerektiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca sönümleyicilerin bağlandığı yapısal elemanların tasarımına da dikkate edilmesi gerektiğini ve çarpışma nedeniyle sönümleyicilerde önemli kuvvetlerin oluşabileceğini ifade etmişlerdir.

Khatami vd. (2022), taban izolasyonlu yapılar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla kauçuk tamponların etkinliğini araştırmışlardır. Analizleri, binalar arasındaki farklı derz boşluklarının yanı sıra kauçuk tamponların çeşitli kalınlık, sayı ve sertlik değerleri dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, çarpışma kuvvetinin artan kalınlık, sertlik ve tampon sayısı ile azaldığını göstermektedir. Taban izolasyonlu binalar arasında deprem kaynaklı çarpışmaların olumsuz etkilerini azaltmak için kauçuk tampon kullanımının etkili bir yöntem olarak kabul edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Taleshian vd. (2022), komşu asimetric plana sahip binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla viskoelastik bağlantı elemanlarının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, plan asimetriklerinin simetrik bitişik binalara kıyasla daha yüksek tepkilere yol açmadığını ve bağlantı elemanlarının ek sönüm sağlayarak yapısal tepkileri etkili bir şekilde azaltılabileceğini ifade etmişlerdir. Bağlantı rijitliğinin azalmasıyla, ilave sönüm nedeniyle binaların göreceli yer değiştirmesinde önemli azalmaların meydana geldiğini ve belirli plan

dışmerkezlilikleri için simetrik planlardakinin iki katına kadar baskın bir modal sönüm oranı elde etmenin mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır.

1.2.4. Deneysel Yöntemlerle Hasar Tespitini İçeren Literatür Taraması

Mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntemler ile belirlenmesinde DMA yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. DMA’da deneysel ölçümler mevcut yapı üzerinden alınması sebebiyle elde edilen sonuçlarla yapının ölçüm alındığı andaki gerçek durumu temsil edilmektedir. Elde edilen deneysel ölçüm sonuçları ile sonlu eleman modelleri doğrulanmakta ve sonlu eleman modellerinde güncellemeler yapılarak ileri düzeydeki yapı sağlığı izlenmesi ve hasar tespiti için veri havuzu oluşturulmaktadır.

Yapılan literatür taraması sonucunda, deneysel çalışmalarda çarpışmanın yapısal davranış ve hasarlar üzerine olan etkilerinin çoğunlukla ihmal edildiği ya da deneyler sırasında binaların elastik sınırlar içerisinde kalacak şekilde tasarlandığı görülmüştür. Benzer şekilde depremler sonrası meydana gelen çarpışma hasarlarının sadece gözlemsel olarak incelendiği tespit edilmiştir. Çarpışma hasarlarının yapısal davranışa olan etkilerinin deneysel yöntemlerle araştırılması üzerine literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu tez ile çarpışmadan dolayı yapı elemanlarında oluşacak hasarların DMA yöntemi ile incelenmesi ve çarpışmanın yapısal davranışa olan etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması hedeflenmiştir.

1.3. Tezin Amacı

Yapılan literatür taraması sonucu mevcut çalışmalarda tespit edilen eksiklikler, bu eksikliklerin giderilmesi için tez kapsamında gerçekleştirilecek çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Literatürde binalar arasındaki çarpışma davranışları, çoğunlukla analitik bir model üzerinden veya geçmişte meydana gelmiş depremler sonrası yapılan gözlemler ile incelenmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, komşu binalar arasındaki etkileşim üzerine az sayıda deneysel çalışma yapıldığı ve bu deneysel çalışmaların oldukça küçük ölçekler seçilerek veya kayma çerçeveleri ile gerçekleştirildiği tespit edilmiştir (Şekil 1.1-1.7). Bu durumda, gerçek yapıların rijitlik ve kütlelerine oranla çok küçük rijitlik ve kütlelerin dikkate

alınması nedeniyle ölçüm sonuçları yeteri kadar güvenilir olmamaktadır (Jankowski, 2010). Ayrıca bu deneysel çalışmaların neredeyse tamamında komşu binalar arasındaki çarpışma davranışı incelenirken küçük ölçekli çelik binaların kullanıldığı, Ülkemizdeki kentsel yapı stoğunun büyük çoğunluğunu oluşturan ve çelik yapılara oranla çarpışmadan çok daha fazla etkilenen betonarme komşu binalar arasındaki çarpışma davranışının incelendiği sadece bir çalışmanın olduğu tespit edilmiştir. Geçmiş yıllarda literatürde gerçekleştirilen bazı çarpışma deneylerine ait görüntüler Şekil 1.1-1.7 ile sunulmuştur. Literatürde bulunan deneysel çalışmalarda bu eksikliği gidermek amacıyla, bu tez çalışmasında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan sarsma masasının kapasitesi göz önünde bulundurularak 1/2 ölçekli betonarme düzlem çerçeve bina modelleri kullanılmıştır. Literatüre oranla çok daha büyük ölçekli betonarme bina modelleri ile gerçekleştirilen deneyler sayesinde bu tez çalışmasının, betonarme binaların çarpışma davranışının deneysel olarak incelenmesi üzerine mevcut boşluğun doldurulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, Ülkemizde konu ile ilgili herhangi bir deneysel çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla, tezin ve sonuçlarının Ülkemizde konu ile alakalı detaylı bir veri havuzunun oluşturulması açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca mevcut yapı stoğumuzu temsil eden yetersiz bina modellerinin kullanılması sayesinde yeni güçlendirme yöntemlerinin ve hazırlanacak olan yeni deprem yönetmeliklerinde derz mesafelerinin araştırılması için gelecek çalışmalara önemli bir veri havuzu oluşturulmaya çalışılmıştır.

Yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalarda tespit edilen bir diğer eksiklik ise deneyler sırasında genellikle tek bir çarpışma türünün dikkate alınmış olması ve çarpışma şeklinin komşu binalar üzerine etkilerini ortaya koymak için çarpışma türlerinin kıyaslamalı olarak incelendiği deneysel çalışmaların oldukça sınırlı olmasıdır. Geçmiş yıllarda meydana gelen depremler sonrası yapılan araştırmalar, bina türü yapılar için çarpışma türlerini 6 grupta toplamışlardır. Bu çarpışma türleri, yapılarda farklı bölgelerde hasarlara neden olabilmektedir. Ayrıca bazı çarpışma türlerinde yapısal hasarlar daha belirgin ve yıkıcı etkilere sahip olabilmektedir. Özellikle kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasında, etkileşim kolon-döşeme arasında gerçekleşmesi sebebiyle depremler sırasında büyük hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu tez kapsamında, depremler sonrası en çok karşılaşılan ve en yıkıcı etkilere sahip çarpışma türlerinden, aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması, kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması ve farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması

türleri kullanılmıştır. Böylece farklı çarpışma türlerinin komşu betonarme binalardaki çarpışma etkilerini ve hasarlarını artırmadaki rolü detaylı bir şekilde araştırılmaya çalışılmıştır.

Depremler sonrası yapılan araştırmalar, yapılarda oluşan bölgesel hasarların genellikle binalar arasındaki yetersiz derz boşluğunun neden olduğu çarpışmalardan kaynaklandığını, bu çarpışmaların yapılarda toptan göçmeye neden olabileceğini ve çarpışma etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur. Ancak, yapılan literatür taraması sonucunda, deneysel çalışmalarda çarpışmanın hasarlar üzerine olan etkilerinin çoğunlukla ihmal edildiği ya da deneyler sırasında binaların elastik sınırlar içerisinde kalacak şekilde tasarlandığı görülmüştür. Bu durum, binalar arasında meydana gelen çarpışmaların yapı davranışına etkilerinin, geçmiş yıllarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tam manasıyla ortaya konulamadığı düşüncesi doğurmaktadır. Öte yandan bu çarpışma hasarlarının, gerek geçmiş yıllarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda gerekse depremler sonrası mevcut binalarda sadece gözlemsel olarak incelendiği tespit edilmiştir. Ayrıca çarpışma hasarlarının yapısal davranışa olan etkilerinin deneysel yöntemlerle araştırılması üzerine literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışması ile çarpışmadan dolayı yapı taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan çarpışma hasarları, sarsma masası deneyleri öncesinde ve sonrasında yapılan titreşim testleriyle deneysel olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen titreşim testleriyle çarpışmanın yapısal davranışa ve yapısal hasarlara olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

Günümüzde onarım ve güçlendirme uygulamalarında oldukça fazla yenilikçi malzemelerin ve tekniklerin kullanılmasına rağmen, komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için dünya genelinde yapılan çalışmalar oldukça sınırlı ve küçük ölçekte olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca literatürdeki bu çalışmaların tamamının çelik binalar veya kayma çerçeveleri kullanılarak yapıldığı, Ülkemizdeki yapı stokunun büyük bir çoğunluğunu oluşturan komşu betonarme binalar arasındaki yıkıcı etkilere sebep olan çarpışma etkilerinin azaltılması üzerine herhangi bir çalışmanın yapılmadığı tespit edilmiştir. Literatürdeki bu eksikliği gidermek için tez kapsamında betonarme komşu binalarda çarpışma etkilerinin azaltılması üzerine bir takım deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu tez kapsamında binaların arasına kauçuk sönümleyicilerin teşkil edilmesi ile çarpışma kuvvetlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Sarsma masası deneyleri sonucunda bu önlemin çarpışma etkilerini azaltmadaki rolü ve etkinlikleri detaylı bir şekilde ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Yukarıda bahsedilenlerden yola çıkarak bu tez çalışmasının amacı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Komşu binalar arasındaki çarpışmaların binaların davranışı üzerine olan etkilerini, yapısal elemanlarda oluşan hasarların çarpışmadan ne ölçüde etkilendiğini, üretilen betonarme binalarda farklı çarpışma türleri dikkate alınarak yapılan sarsma masası deneyleri ile araştırmak ve çarpışma sonucu oluşan hasarların deneysel yöntemlerle tespitinin yapılmasıdır. Ayrıca, komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için kullanılabilecek kauçuk sönümleyicilerin etkinliklerinin de değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında belirlenen amaçlara ulaşabilmek için izlenen yol adımları kısaca şu şekildedir:

- Laboratuvar ortamında hazırlanacak betonarme numunelerin başlangıç (hasarsız) dinamik karakteristiklerinin DMA yöntemi ile belirlenmesi,
- Farklı çarpışma türleri dikkate alınarak oluşturulan betonarme numunelerin, seçilen yer hareketleri altında sarsma masası deneylerinin gerçekleştirilmesi,
- Her bir sarsma masası deneyleri sonrasında hasarlı dinamik karakteristiklerin DMA yöntemi ile belirlenmesi,
- Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak incelenmesi, çarpışmanın olduğu ve olmadığı durumlarda yapısal tepkilerdeki (kat ivmeleri, yer değiştirmeler, görelî kat ötelemeler, histerezis davranış, taban kesme kuvvetleri) değişimin incelenmesi, dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkların değerlendirilmesi ve hasar tespitinin yapılması,
- Çarpışma etkilerini azaltmak için kauçuk sönümleyicilerin deney numunelerine uygulanması, sarsma masası deneylerinin tekrarlanarak kullanılan yöntemin etkinliğinin araştırılmasıdır.

1.4. Komşu Binalar Arasındaki Çarpışma Türleri

Komşu binalar arasındaki çarpışma birçok şekilde gerçekleşebilmekte ve çarpışmalar sadece en üst katlarda değil orta katlarda da meydana gelebilmektedir. Bina türü yapılar için çarpışma çeşitleri 5 grupta toplanmıştır: (i) biri diğerine göre daha ağır olan binaların çarpışması, (ii) kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması, (iii) farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması, (iv) eksantrik çarpışma, (v) ikiden fazla bina arasında meydana gelen

Çarpışma. Bunlara ek olarak yığma binalar arasındaki çarpışmalara ayrılmış olan altıncı tip etkileşim türü de bulunmaktadır (Cole vd., 2010a; Cole vd., 2012). Meydana gelen her bir çarpışma türü yapılar da farklı hasarlara sebep olabilmekte, bazı çarpışma türlerinde yapısal hasarlar daha belirgin hale gelebilmekte ve binaların tamamen göçmesine sebep olabilmektedir. Bunlara ek olarak köprü tabliyelerindeki genleşme derzlerinde de çarpışmaların meydana gelebildiği ve bu çarpışmalar sonucu köprü kirişlerinin yuvalarından çıkabildiği ve tabliyelerde hasarların meydana gelebildiği geçmiş yıllardaki depremler de gözlemlenmiştir (Muthukumar, 2003).

1.4.1. Biri Diğerine Göre Daha AĞır Olan Komşu Binaların  arpışması

Farklı ağırlıktaki binaların kat seviyelerinde çarpışması sonucu, hafif olan bina ağır olan binaya göre daha fazla hasar görmektedir. Bölgesel hasarların dışında ağır binaların yer hareketi etkisi altında davranışının çarpışmalardan fazla etkilenmediği görülmektedir ( etinkaya, 2011; Jankowski, 2010; Chau vd., 2006). Cole vd. (2010a) ağır binadan momentum transferinin, çarpışma sırasında daha hafif yapının hızında büyük artışlar meydana getirebileceği ve böylece daha hafif binanın çarpışma etkilerine karşı daha hassas olduğunu ifade etmiştir. Ancak literatürdeki bazı çalışmalar ağır binaların hafif olan binalara göre çarpışmadan daha fazla etkilendiğini, çarpışmanın ağır binaların tepkilerini artırırken hafif binanın tepkilerini azalttığını ifade etmiştir (Chau vd., 2003).

1.4.2. Kat Yükseklikleri Farklı Komşu Binaların  arpışması

Bu  arpışma türünde komşu binaların kat yükseklikleri farklı olması sebebiyle döşeme-kolon arasında çarpışma meydana gelmektedir. Etkileşimin döşeme ve kolon arasında gerçekleşmesi sebebiyle bu çarpışma tipinin yıkıcı etkileri diğer çarpışma türlerinden daha fazladır. Özellikle çarpışmaya maruz kalan kolonlar çok yüksek kesme kuvvetlerine maruz kalır. Bu kolonlar yönetmelik gereksinimlerini sağlasa bile etkileşim sırasında oluşan çarpışma kuvvetlerinin büyüklüklerine bağlı olarak artan kesme kuvvetleri nedeniyle kolonlarda ciddi hasarlar meydana gelebilmekte ve kolonlar tamamen işlevsiz kalabilmektedir (Cole vd., 2010a;  etinkaya, 2011). Gerek  lkemizde gerekse dünyada

meydana gelmiş geçmiş depremlerde bu çarpışma türünün yıkıcı etkileri açık bir şekilde araştırmacılar tarafından ortaya koyulmuştur (Şekil 1.8).



1998 Adana depremi



-



1999 Athens depremi



2009 L'Aquila depremi



2011 Van depremi



Şekil 1.8. Kolon-döşeme çarpışmaları nedeniyle betonarme binalarda oluşan hasar (Tezcan, 2013; Korkmaz, 2015; Chenna ve Ramancharla, 2018; Hüsem, 2022)

1.4.3. Farklı Yüksekliğe Sahip Komşu Binaların Çarpışması

Deprem esnasında, kısa olan binaya göre daha fazla yer değiştirme yapan yüksek binanın alt katlardaki hareketi kısa bina tarafından engellenmektedir. Bu nedenle çarpışma kısa olan binanın en üst döşeme seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu durum yüksek binaların yer değiştirme davranışını değiştirmektedir. Yüksek binada çarpışmaya maruz kalan alt katlar tutulurken, binanın geri kalanı tepeden “kırbaçlanır”. Bu, çarpışmanın gerçekleştiği katın hemen üstündeki katta kesme taleplerinde büyük bir artışa neden olur (Cole vd., 2010a). Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması durumunda, yüksek olan binanın daha fazla hasar aldığı görülmektedir. Çarpışma sırasında ortaya çıkan büyük kesme kuvvetleri hem çarpışma bölgesinde hem de çarpışma bölgesi üstündeki katlarda ciddi bölgesel hasarlara neden olabilmektedir (Çetinkaya, 2011). Bu duruma en iyi örnek 1985 Mexico City depremi sonrasında Hotel de Carlo binasında oluşan çarpışma hasarlarıdır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Farklı yüksekliğe sahip komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar (URL-1; URL-2)

1.4.4. Burulma Kaynaklı Komşu Binaların Çarpışması

Yapının ağırlık merkezine etki eden deprem kuvvetleri, yapının rijitlik merkezi tarafından karşılanmaktadır. Kütle ve rijitlik merkezi çakışmayan binalarda, dış merkezliğe ve yer hareketinin büyüklüğüne bağlı olarak burulmalar hareketi meydana gelebilmektedir. Burulmanın meydana geldiği binalar arasında yeteri kadar boşluk bırakılmamışsa binaların köşe kolonlarında noktasal çarpışma sebebiyle ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Binalarda kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışması durumunda dış merkezlik oluşmayacağı

için binalar arasındaki etkileşim noktasal değil çizgisel olarak gerçekleşir. Çizgisel çarpışma durumunda çarpışma enerjisi noktasal çarpışmanın aksine tüm bina boyunca karşılanması sebebiyle yapı elemanlarında daha az hasar oluşmaktadır (Çetinkaya, 2011). Chau vd. (2004), çeşitli eksantrisite oranları dikkate alarak gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, burulma kaynaklı çarpışmalarda yapısal tepkilerin burulmadan dolayı önemli ölçüde artabileceğini ifade etmişlerdir.

1.4.5. Aynı Sıradaki İki Den Fazla Komşu Binanın Çarpışması

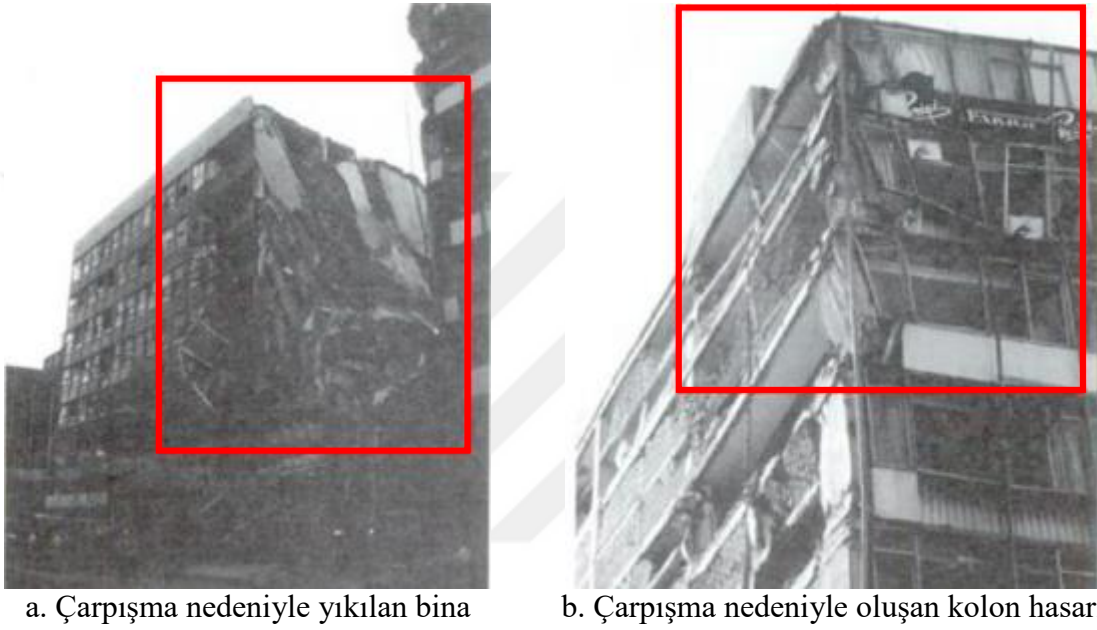
Binalar arası derzlerin çok az olduğu veya hiç olmadığı benzer binalardan oluşan bir sokakta binaların birbiriyle çarpışması durumunda, içte kalan binalar her iki taraftan da çarpışmaya maruz kaldıklarından iki yönde de hareketleri kısıtlanmış olur. Köşe binalarda ise iç binalardan momentum aktarımı nedeniyle yapısal tepkilerinde önemli artışlar meydana gelir ve çarpışma hasarlarına maruz kalırlar (Ohta vd., 2006). Ayrıca Cole vd. (2010a) iç binaların, çarpışmanın olmaması durumuna göre depremde daha az hasar görebileceğini ifade etmişlerdir.

1.5. Geçmiş Depremlerde Meydana Gelen Çarpışma Hasarları

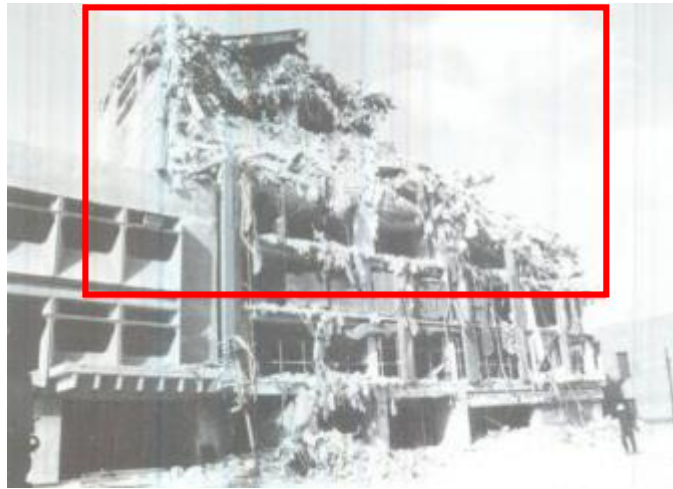
Bu bölümde, geçmiş depremler sonucu gerek Ülkemizde gerekse dünya genelinde gözlemlenen çarpışma olayları ve yapısal hasarlar ele alınmıştır. Depremler sonrası yapılan araştırmalar, yapılarda oluşan bölgesel hasarların genellikle binalar arasındaki yetersiz derz boşluğunun neden olduğu çarpışmalardan kaynaklandığını, bu çarpışmaların yapılarda toptan göçmeye neden olabileceğini ve çarpışma etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur (Rosenblueth ve Meli 1986; Kasai ve Maison, 1991; Raheem vd., 2019).

Özellikle nüfusun yoğun olduğu kentsel yerleşim bölgelerinde büyük ölçekli depremlerin çoğunda çarpışma kaynaklı hasarlar gözlenmiş ve rapor edilmiştir (Brown ve Elshaer, 2022). Örneğin, 1985 Mexico City depreminde, yoğun nüfusa sahip metropol şehirlerde çarpışma nedeniyle önemli yapısal hasarlar meydana gelmiştir. Bu deprem sonrası yapılan araştırmalar, ciddi hasar gören 330 binanın %40'ında çarpışma hasarlarının gözlemlendiğini ve bunların %15'inin çarpışma nedeniyle tamamen yıkıldığını rapor etmiştir (Rosenblueth ve Meli, 1986; Stone vd., 1987). Şekil 1.10'da 1985 Mexico City depremi

sırasında benzer yüksekliğe sahip iki bina arasında meydana gelen çarpışmalar nedeniyle oluşan hasarlar görülmektedir. Burada 7 katlı binanın bir bölümü çarpışma nedeniyle yıkılırken, 9 katlı binada çarpışma sırasında aktarılan kesme kuvvetleri nedeniyle kolon hasarları oluşmuştur. Şekil 1.11’de ise farklı yüksekliğe sahip komşu binaların çarpışması nedeniyle hem çarpışma bölgesinde hem de çarpışma bölgesi üstündeki katlarda oluşan hasarlar görülmektedir (Stone vd., 1987).



Şekil 1.10. 1985 Mexico City depreminde benzer yüksekliğe sahip komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar (Brown ve Elshaer, 2022)



Şekil 1.11. 1985 Mexico City depreminde komşu binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar (Brown ve Elshaer, 2022)

1972 Managua depremi sırasında beş katlı bir otel binasının her iki yanında bulunan iki katlı binalar ile çarpışması sonucu otel binasının üçüncü katının yıkıldığı gözlemlenmiştir (Garcia, 2004). 1981 yılında meydana gelen Central Greece depreminde ciddi hasarların çoğunlukla kat yükseklikleri farklı binalar arasında oluşan döşeme-kolon çarpışması sonucu meydana geldiği ve aynı sırada inşa edilmiş komşu binalardan en dışta kalan binaların çarpışmadan daha fazla etkilendiği belirtilmiştir (Garcia, 2004).

Kasai ve Maison (1997), 1989 Loma Prieta depreminin neden olduğu bina çarpışmalarına ilişkin bir araştırma raporu sunmuşlardır. Bu rapora göre, San Francisco, Oakland, Santa Cruz ve Watsonville şehirlerini içeren geniş bir coğrafi alanda komşu binalar arasındaki çarpışma olayı gözlenmiştir. Ayrıca, 1989 Loma Prieta depreminde 500’den fazla binanın çarpışmadan etkilendiğini ve bu çarpışan binaların depremin merkez üstüne 90km uzaklıkta bulunduğunu, yakın bir çevrede meydana gelecek olası bir depremde çarpışma hasarlarının daha da yıkıcı boyutlara ulaşabileceğini ifade etmişlerdir.

Cole vd. (2010b), 2010 Darfield depremi sonrasında çarpışmaların komşu binalar üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla Christchurch şehrinin merkezi bir bölgesinde sokak araştırması gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma sonucunda, çarpışmanın neden olduğu orta ve şiddetli hasarların donatısız yığma binalarda yoğunlaştığını ortaya koymuşlardır. Bu yapılarda hasarların düşey yapı elemanlarında yoğunlaştığını ve bitişik basamak halindeki cephelerinde çarpışma etkilerine karşı duyarlı olduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 1.12’de 2010 Darfield depreminde çarpışma nedeniyle yığma bir binada meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 1.12. 2010 Darfield depreminde hasar gören yığma bina (Cole vd., 2010b)

Cole vd. (2012), 2011 Christchurch depremi sonrasında, bina hasarlarının ve göçmelerinin yapısal çarpışmadan ne ölçüde etkilendiğini araştırmışlardır. 374 binayı ele aldıkları çalışmada, genel olarak çarpışma etkilerinin yapılarda ikincil hasarları oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Ancak incelenen binaların %6'sından fazlasının önemli çarpışma hasarı gördüklerini tespit etmişlerdir. 374 binanın 119'unda çarpışma hasarları ile karşılaşıldığını, 26 binada çarpışma nedeniyle ciddi hasarlar meydana geldiğini, çarpışmanın gerçekleştiği 18 binada kısmi göçmelerin yaşandığı ve 2 binanın tamamen yıkıldığını ifade etmişlerdir. Ancak yıkılan bu iki binada göçmeye çarpışmanın neden olup olmadığı tam olarak belirlenemediği de vurgulamışlardır. Şekil 1.13'te bu deprem sonrası yıkılan komşu binalar görülmektedir. Öte yandan bu deprem yığma binaların çarpışma etkilerine karşı oldukça hassas olduğunu da ortaya koymuştur (Chouw ve Hao, 2012).



a. Deprem öncesi



b. Deprem sonrası

Şekil 1.13. 2011 Christchurch depremi sonrasında hasar gören komşu binalar

Shrestha ve Hao (2018), 2015 Gorkha depremi sırasında bitişik binalar arasında çarpma sonucu oluşan hasar hakkında bilgiler sunmuşlardır. Orta Nepal'in etkilenen bölgesinde gözlemlenen çarpışma olaylarını farklı hasar düzeylerine göre sınıflandırmışlardır. Modern betonarme binaların çarpışmadan az etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Ancak deprem sırasında yıkılan bazı binalarda çarpışma izlerinin görüldüğünü, yıkılmanın temel nedeninin çarpışma olduğuna dair sınırlı kanıtların olduğunu ve bu binalarda başka tasarım hatalarının olduğunu da ifade etmişlerdir. 2011 Christchurch depremi'ne benzer şekilde yığma binalarda çarpışma etkileri önemli hasarlara neden

olmuştur. Bitişik betonarme yapılar ile çarpışan yığma binaların önemli hasarlar aldığını ifade etmişlerdir.

1999 yılında Ülkemizde meydana gelen Kocaeli depremi sırasında aralarında yeterli miktarda boşluk bulunmayan komşu binaların çarpışması sonucu bu binaların önemli ölçüde hasarlar aldığı belirtilmiştir. Yine aynı deprem sırasında, farklı yüksekliğe sahip iki komşu binanın çarpışması sonucu kısa olan binanın en üst katındaki kolonların çarpışma nedeniyle oluşan büyük kesme kuvvetleri sonucu yıkıldığı tespit edilmiştir (Muthukumar, 2003; Jankowski, 2009). Benzer şekilde, 2011 Simav ve Van depremlerinde de komşu binaların çarpışma sebebiyle hasarlar aldığı ifade edilmiştir (Özmen vd., 2011; İnel vd., 2013; Korkmaz, 2015). Son yıllarda meydana gelen 2020 Sivrice-Elazığ ve 2022 Gölyaka-Düzce depremlerinde de komşu binalar arasında çarpışmalar rapor edilmiştir (Demir vd., 2021; Ertürk vd., 2022). Ülkemizde meydana gelen depremler sonrasında çarpışma nedeniyle hasar gören yapılara ait bazı görseller Şekil 1.8’de sunulmuştur.

1.6. Komşu Binalar Arasındaki Derzler Mesafeleri

Araştırmacılar, komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini önlemenin en etkili yollarından birinin, komşu binalar arasında uygun derz mesafesinin bırakılması olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, binalar için optimum boşluk oranının ya çarpışmayı tamamen önleyecek kadar büyük olması gerektiğini yada hiç boşluk bırakılmaması gerektiğini ortaya koyan çalışmalarda mevcuttur (El-Khoriby vd., 2015). Bu derz mesafelerinin hesabı için birçok yöntem bulunmaktadır. Ayrıca dünya genelinde yaygın olarak kullanılan Eurocode-8 (2004), Standad-2800 (2007), ASCE7-16 (2016) ve TBDY-2018 (2018) gibi yönetmeliklerde de komşu binalar arasında bırakılması gereken minimum derz mesafeleri için koşullar ve tavsiyeler sunulmaktadır. Bunların çoğu, doğrusal davranışa ait yer değiştirmelere ve/veya bina yüksekliğine bağlı olarak derz mesafelerinin belirlenmesini önerirken, bazıları ise doğrusal davranışa ait yer değiştirme tepkilerini bir katsayı ile değiştirerek doğrusal olmayan yer değiştirmelere dayalı olarak derz mesafelerinin hesaplanmasını önermektedir.

Araştırmacılar, deprem etkileri altında komşu binalar arasındaki çarpışmaları önlemek ve derz mesafelerini hesaplamak için bina yer değiştirmelerin mutlak toplam (ABS) ve kareleri toplamının karekökü (SRSS) gibi çeşitli yöntemleri elde almışlardır. Mutlak toplam yönteminde gerekli derz mesafesi, komşu binaların tepe yer değiştirmelerinin mutlak

toplamı olarak hesaplanır (Denklem 1.1). Bu yöntem UBC97 (1997)'de dahil olmak üzere birçok yönetmelik tarafından benimsenmiştir. Komşu binalarda aynı anda en büyük yer değiştirmelerin meydana gelme olasılığının oldukça düşük olması nedeniyle bu yöntem oldukça konservatiftir. Bu amaçla, araştırmacılar derz mesafesi için komşu binaların tepe yer değiştirmelerinin kareleri toplamının karekökünü dikkate alan bir yöntem önermişlerdir (Anagnostopoulos, 1992). Ancak, farklı yapısal sistemlere sahip binalar arasında çarpışma meydana geldiğinde ve doğrusal olmayan davranış dikkate alındığında bu yöntem yeteri kadar konservatif değildir (Jamal ve Vidyadhara 2013; Ehab vd., 2014;). Bu nedenle, Jeng vd. (1992) çarpışmayı önlemek için gerekli minimum mesafenin hesabına yönelik çift fark yöntemi (DDC) veya tam karesel birleştirme (CQC) olarak bilinen spektral fark yöntemi temelinde üçüncü bir denklem önermiştir (Denklem 1.3). Bu denklem SRSS yönteminden farklı olarak, çarpışma olayı sırasındaki belirsizlikleri temsil eden kolerasyon faktörünü (ρ) içermektedir (Denklem 1.4). Literatürde bu kolerasyon faktörünü değerlendirmek için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir (Filiatrault vd., 1994; Kasai vd., 1996; Penzien, 1997). Lopez-Garcia ve Soong (2009a), doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için bu değerlendirme yöntemlerinin güvenilirliğini araştırmıştır ve doğrusal olmayan sistemler için SRSS yöntemi ile elde edilen sonuçların bu yöntemler ile elde edilenlere kıyasla daha güvenilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

$$S_{ABS} = U_1 + U_2 \quad (1.1)$$

$$S_{SRSS} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (1.2)$$

$$S_{DDC} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2\rho U_1 U_2} \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{8(\sqrt{\xi_1 \xi_2}) \left(\xi_2 + \xi_1 \frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1.5}}{\left[1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \right]^2 + 4\xi_1 \xi_2 \left[1 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \right] \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + 4(\xi_1^2 \xi_2^2) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2} \quad (1.4)$$

Burada S gerekli derz mesafesini, U_1 , ξ_1 ve T_1 ilk binanın tasarım yer değiştirmesini, sönüm oranını ve doğal titreşim periyodunu ifade etmektedir. U_2 , ξ_2 ve T_2 ikinci binanın tasarım yer değiştirmesini, sönüm oranını ve doğal titreşim periyodunu ifade etmektedir.

Lopez-Garcia ve Soong (2009b), DDC yöntemiyle elde edilen derz mesafelerinin ne derece güvenli sonuçlar verdiğini araştırmış ve bu yöntemin doğruluğunun ele alınan binaların doğal titreşim periyotlarına ve depremin baskın olduğu periyoda (T_m) bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. $T_1 < T_2$ olduğu varsayarak, bu yöntemle elde edilen derz mesafelerinin güvenilirliğini aşağıdaki gibi tartışmışlardır:

- $T_2 < T_m - T_1$ olduğunda, DDC yöntemiyle elde edilen derz mesafeleri her zaman yeterlidir. Formülün güvenilirliği aşağıdaki durumlara bağlı olarak artabilmektedir:
 - T_1 / T_2 oranının artması
 - Belirli bir T_1 / T_2 oranı için T_1 ve T_2 değerlerinin azalması.
- $T_2 > T_m - T_1$ olduğunda, DDC yöntemiyle elde edilen derz mesafelerinin yeterliliği T_1 / T_2 oranına bağlıdır:
 - T_1 / T_2 oranının 0.75'den küçük olması durumunda, elde edilen derz mesafeleri her zaman yetersizdir.
 - T_1 / T_2 oranının 0.75'den büyük olması durumunda, elde edilen derz mesafeleri her zaman yeterlidir ve formülün güvenilirliği aşağıdaki durumlara bağlı olarak artabilmektedir:
 - T_1 / T_2 oranının artması
 - Belirli bir T_1 / T_2 oranı için T_1 ve T_2 değerlerinin artması.
- $T_2 = T_m - T_1$ olduğunda, DDC yöntemiyle elde edilen derz mesafeleri her zaman yeterlidir.

Hong vd. (2003); Garcia (2005); Hong vd. (2005), CQC yöntemi ile komşu binalar arasındaki derz mesafelerini belirlemişlerdir. Ancak sayısal sonuçlar, bu yöntem ile elde edilen mesafelerinin bazı durumlarda yetersiz olduğu bazı durumlarda ise gereğinden fazla olduğunu ortaya koymuştur. Gerekli derz mesafesi ve CQC yöntemi ile elde edilen mesafe arasındaki ilişki Denklem (1.5) ile sunulmuştur.

$$S = \begin{cases} 0.9D_{CQC} & 0.8 < T_1 / T_2 < 1.2 \\ 1.0D_{CQC} & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (1.5)$$

Wang ve Hong (2006), sabit olmayan bir uyarım (nonstationary excitation) dikkate alarak yukarıda bahsedilen çalışmayı genişletmiştir ve sonucunda CQC yöntemi ile belirlenen derz mesafeleri için Denklem (1.6) ile sunulan bağıntıyı önermişlerdir.

$$S = \begin{cases} 0.9D_{CQC} & 0.75 < T_1 / T_2 < 1.25 \\ 1.1D_{CQC} & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (1.6)$$

Shrestha (2013), doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri dikkate alarak ABS, SRSS ve DDC yöntemleri ile elde edilen derz mesafelerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. ABS yöntemi ile elde edilen derz mesafelerinin her zaman konservatif olduğunu ve gerekli mesafeyi her zaman fazla belirlediğini ifade etmiştir. SRSS ile belirlenen mesafelerin ise komşu binaların doğal titreşim periyotlarının birbirine yakın olması durumunda yeterli olduğunu ve bu yöntemin doğal titreşim periyotlarının birbirinden farklı olması durumunda yetersiz sonuçlar verebileceğini ortaya koymuşlardır. DDC yönteminin derz mesafelerini belirlemek için en uygun yöntem olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak Miari vd. (2019), Shrestha (2013)'nın çalışmasında sadece bir yer hareketi dikkate aldığını ve sonuçların daha fazla araştırma yapılarak doğrulanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Barbato ve Tubaldi (2013), DDC yöntemi ile elde edilen derz mesafelerinin diğer yöntemlere kıyasla daha güvenilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayrıca dünya genelinde yaygın olarak kullanılan yönetmeliklerde de komşu binalar arasında bırakılması gereken minimum derz mesafeleri için koşullar ve tavsiyeler sunulmaktadır. Tayvan Bina Yönetmeliği (TBC, 1997), komşu binalar arasındaki derz mesafeleri için Denklem (1.7) ile sunulan bağıntıyı önermektedir.

$$S_{TBC-97} = 0.6(\Delta u_1 + \Delta u_2) \quad (1.7)$$

Burada, Δu_1 ve Δu_2 komşu binalar için izin verilen elastik olmayan yer değiştirme değerini ifade etmektedir. Bu yönetmelik, iki binanın en büyük yer değiştirmelerinin aynı anda nadiren ortaya çıkabileceğini dikkate alarak derz mesafesi için toplam elastik olmayan yer değiştirme değerlerini bir azaltma faktörü ile çarpılmaktadır. Lin ve Weng (2002); Lin (2005), TBC-1997'ye göre belirlenen bu derz mesafelerinin oldukça konservatif olduğunu ve azaltma katsayısı olarak 0.6 yerine 0.375 kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Avustralya yönetmeliği (AS1170.4, 2007) ise derz mesafeleri için Denklem (1.8)'i önermektedir. Burada, komşu binalardan daha yüksek olanının toplam yüksekliğinin (H_{max}) %1'i derz mesafesi olarak dikkate alınmaktadır. İran deprem yönetmeliği (Standard 2800, 2007)'nde de benimsenen bu yaklaşımın komşu binalar arasında bırakılması gereken boşluk için konservatif olduğunu ifade eden çalışmalarda mevcuttur (Hao, 2015).

$$S_{AS1170.04-07} = 0.01H_{\max} \quad (1.8)$$

ASCE7-16 (ASCE, 2016)'da gerekli derz mesafesi, SRSS yönteminde elastik olmayan yer değiştirmeler dikkate alınarak elde edilmektedir (Denklem 1.9). δ_{M1} ve δ_{M2} komşu binaların elastik olmayan yer değiştirmesini ifade etmektedir. Her bir bina için elastik olmayan yer değiştirmeler, yer değiştirme büyütme faktörü (C_d), en büyük elastik yer değiştirme ($\delta_{\max}$) ve önem faktörü (I) kullanılarak Denklem (1.10) ile hesaplanır.

$$S_{ASCE7-16} = \sqrt{\delta_{M1}^2 + \delta_{M2}^2} \quad (1.9)$$

$$\delta_M = C_d \delta_{\max} / I \quad (1.10)$$

Eurocode-8 (EC-8, 2004)'de ABS ve SRSS yöntemlerinde etkileşimin meydana geleceği kat seviyesindeki en büyük yatay yer değiştirmeler kullanılarak elde edilen minimum derz mesafesi kullanılmaktadır (Denklem 1.11-1.12). Komşu binaların potansiyel çarpışma katındaki maksimum yer değiştirmeler (δ), doğrusal analizden elde edilen elastik yer değiştirme ile davranış faktörünün (q) çarpılması ile elde edilir (Denklem 1.13).

$$S_{EC-8a} = |\delta_1| + |\delta_2| \quad (1.11)$$

$$S_{EC-8b} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \quad (1.12)$$

$$\delta = q\delta_{el} \quad (1.13)$$

TBDY-2018'de farklı oturmalar ve sıcaklık etkileri dışında, sadece deprem yer hareketi için bırakılması gereken derz boşlukları için bir takım koşullar verilmiştir. Bu koşullar:

- Komşu binalar arasında bırakılacak minimum derz boşluğu, 6m yüksekliğe kadar en az 30mm olacaktır. Bu minimum derz boşluğuna, 6m'den sonraki her 3m'lik yükseklik için en az 10 mm eklenecektir.
- 1. Koşula göre daha elverişsiz bir sonuç elde edilmedikçe binalar arasında bırakılacak derz boşlukları, her bir kat için komşu yapıdan elde edilen yer değiştirmelerin karelerinin toplamının karekökü ile bir a katsayısının çarpımı sonucu bulunan değerden az olmayacaktır. Bu a katsayısı çarpışma türü, taşıyıcı sistem

davranış katsayısı (R) ve bina önem katsayısına (I) bağlı olarak aşağıdaki esaslara göre hesaplanacaktır:

- Komşu binaların kat döşemelerinin bütün katlarda aynı seviyede olmaları durumunda (döşeme-döşeme çarpışması) $a=0.25(R/I)$ olarak dikkate alınacaktır.
- Komşu binaların veya bina bloklarının kat döşemelerinin, bazı katlarda olsa bile, farklı seviyelerde olmaları durumunda (döşeme-kolon çarpışması) $a=0.50(R/I)$ olarak dikkate alınacaktır.

1.7. Dinamik Karakteristiklerin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi

Yapıların dinamik karakteristiklerinin yerinde yapılan ölçümlerle tayin edilmesi amacıyla DMA yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntem ölçüm sırasında dikkate alınan etkiye bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır: (i) Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY), (ii) Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY). Tez çalışması kapsamında, deney numunelerine ait dinamik karakteristikler çevresel titreşim testler ile belirlenmiştir. Dolayısıyla tez çalışmasının bu bölümünde bu yönetime ait denklemler ve tanımlar sunulmaktadır. Ayrıca, DMA yönteminde kullanılan ekipmanlara ait detaylar, ölçüm sürecinde dikkat edilmesi gereken hususlarda tartışılmaktadır.

1.7.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ekipman ve Sistemler

1.7.1.1. Titreştiriciler

DMA yöntemi, incelenen yapıların titreşim tepkilerini doğal veya suni etkileri kullanarak ölçmeyi hedefler. Yapıların titreşim tepkileri, sismik uyarım, trafik, rüzgar gibi doğal etkilerden kaynaklanan titreşimlerle ölçülebileceği gibi sarsma masaları ve darbe çekiçleri gibi suni etkilerin neden olduğu titreşimler ile de ölçülebilmektedir. Büyük yapıların yapay yollarla titreştirilmesinin mümkün olmaması, bu tip yapıların ölçümlerinde genellikle doğal titreşimlerin dikkate alınmasına neden olmaktadır. Ölçümler sırasında doğal etkilerin dikkate alınması ölçüm maliyetlerini de olumlu etkilemektedir. Nispeten daha küçük yapıları ve laboratuvar koşullarında üretilen numuneleri titreştirmek amacıyla doğal etkilerin yanı sıra suni titreştiriciler de kullanılabilir. Bu nedenle suni titreştiricilerin seçiminde ele alınan yapının büyüklüğü ve rijitliği dikkate alınmalıdır (Altunışık, 2010).

1.7.1.1.1. Darbe Çekiçleri

Bu tip titreştiriciler, nispeten daha küçük yapıların ve laboratuvar koşullarında üretilen numunelerin ölçümlerinde tercih edilmektedir. Bu çekiçler sayesinde, büyüklük ve zamanla değişimi belirlenebilen titreşimlerin yanı sıra rastgele titreşimler de uygulanabilmektedir. Uygulanan etkinin özellikleri çekiçte mevcut olan kuvvet sensörleri yardımıyla belirlenebilmektedir. Ölçümler sırasında, ele alınan yapının büyüklüğü ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak uygun çekiç ve çekiç başlığı (yumuşak, orta sert ve sert başlıklar) kullanılmalıdır. Sarsma masası deneylerinin gerçekleştirildiği Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı bünyesinde bulunan Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekiciine ait görsel Şekil 1.14’te sunulmuştur.



Şekil 1.14. Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekici (URL-3)

1.7.1.1.2. Sarsıcılar

Bu tip titreştiriciler kullanılarak, ele alınan yapının tipine ve hakim titreşim frekansına bağlı olarak çeşitli özelliklerde dalga hareketleri uygulanabilmektedir. Bunlar çoğu zaman gerçek yapılar üzerinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında tercih edilmektedir. Ölçümler esnasında sarsıcıların yapı üzerine uygun bir şekilde teşkil edilmesi, hedeflenen titreşimin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Büyük yapılarda bu tip bir titreştirici ile uyarılması istendiğinde kullanılan sarsıcı sayısı ölçüm maliyetini artırabilmektedir. Ayrıca hatalı kullanımları sonucunda yapıya hasar verme ihtimalide bulunmaktadır. Sarsma masası deneylerinin gerçekleştirildiği Karadeniz Teknik

Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı bünyesinde mekanik tip sarsıcı (APS400) bulunmaktadır. Ayrıca, ölçümlerde elektro-manyetik ve elektro-hidrolik tiplerde de sarsıcılar kullanılabilir. APS400 tipi mekanik sarsıcıya ait görsel Şekil 1.15'te sunulmuştur.



Şekil 1.15. APS400 tipi mekanik sarsıcı (URL-4)

1.7.1.2. İvmeölçerler

DMA yöntemi ile gerçekleştirilen ölçümlerde, ele alınan yapının özelliklerine (tipi, hakim titreşim frekansı, vb.) bağlı olarak uygun ivmeölçerler seçimi önemli konulardan biridir. Yapılardaki titreşim tepkileri ivmeölçerler vasıtasıyla ölçülmektedir. MEMS kapasitif, piezoelektrik ve piezorezistif gibi çeşitli türlerde ivmeölçerler mevcut olup, yapılarda titreşim tepkilerinin elde edilmesinde çoğu zaman piezoelektrik ivmeölçerler tercih edilmektedir (Günaydın, 2016).

DMA yöntemi ile dinamik karakteristikler belirlenirken, titreşim sinyallerinin kalitesi ve tepe noktalarının netliği ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçerlere bağlıdır. Bu nedenle, tüm önemli dinamik özelliklerin yeterli doğrulukla elde edilmesini ve yapısal tanımlama için uygun ivmeölçer tipleri tercih edilmelidir (Sunca vd., 2021b). İvmeölçer seçiminde, ölçülebilecek frekans aralığı, sinyallerin bozulmadan/kaybedilmeden belirleneceği maksimum ve minimum ivme genliği değeri, ölçüm hassasiyeti ve çalışma sıcaklığı gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlara ek olarak ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer ağırlıklarının ve boyutlarının, yapınınakilere kıyasla daha küçük olması gereklidir (Sevim, 2010). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı bünyesinde Brüel&Kjaer 4507 B 005 005 (1V/g hassasiyet, 0.4-6000Hz frekans aralığı, $\pm 7g$ maksimum ivme), Brüel&Kjaer 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler (10V/g hassasiyet, 0.1-

1500Hz frekans aralığı, $\pm 0.5g$ maksimum ivme) ve Brüel&Kjaer 4506 B 003 (0.5V/g hassasiyet, 0.3-2000Hz frekans aralığı, $\pm 14g$ maksimum ivme) tipi üç eksenli ivmeölçerler bulunmaktadır ve bunlara ait görseller Şekil 1.16'da verilmiştir. Tez kapsamında ise Brüel&Kjaer 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır.



Şekil 1.16. B&K 8340, B&K 4507 B 005 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ve B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçer

1.7.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Yapıya teşkil edilen ivmeölçerler ile ölçülen ham titreşim sinyallerini toplamak ve bunların işlemesi için ilgili yazılımlara transfer etmek amacıyla veri toplama ünitesi kullanılmaktadır. Toplanan ham titreşim sinyallerinin işlenmesi ve anlamlı veriler oluşturulması için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. DMA yöntemi ile yapılara ait dinamik karakteristikler belirlenirken ham titreşim sinyallerini toplanma ve işleme süreçleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Yapılardan ivmeölçerler vasıtasıyla ölçümlen titreşim sinyalleri, yapıların titreşim tepkilerini ve gürültüleri içermesi nedeniyle ham haldedir. Bu sinyallerin doğrudan kullanılması yanlış değerlendirmelere neden olabileceği gibi, yapısal davranışın doğru bir şekilde tanımlanmasını da zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, ham titreşim sinyalleri sinyal koşullama işlemi ile istenilen özelliklere getirilmelidir. Sinyal koşullama ile gürültü tepkilerinin bastırılması, sinyal kalitesinin artırılması, gereksiz/istenmeyen sinyallerin temizlemesi, ihtiyaç duyulduğunda ise ivmeölçer davranışının idare etmesi hedeflenmektedir. Bu süreç, veri toplama sistemlerinde var olan sinyal koşullandırıcılar ile

yürütülmektedir. Sinyal koşullama sürecinde en önemli işlem gereksiz/istenmeyen sinyallerin veri havuzundan temizlemesidir. Ölçüm için belirlenen frekans aralığı dışında olan yüksek frekans sinyallerinin varlığı, gereksiz/istenmeyen sinyaller olarak değerlendirilir. Bu amaçla ölçümler için belirlenen frekans aralığı ve sinyallerin frekans içeriği uygun bir şekilde değerlendirilmelidir, konu ile ilgili kapsamlı bilgiler Heylen vd. (2007); Ramos (2007)'dan erişilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sırasında Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi kullanılmıştır. 17 kanala sahip olan bu cihaz sensör sayısının veya uzun açıklıklı yapılarda kablo uzunluğunun yetersiz olması gibi durumlarda referans sensörler vasıtasıyla referanslı ölçümlerin gerçekleştirilmesine müsaade etmektedir. Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesine ve kullanılan bilgisayara ait görsel Şekil 1.17'de sunulmuştur.



Şekil 1.17. Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi

Yapılardan elde edilen ham titreşim sinyallerinin anlamlı veriler oluşturması ve dinamik karakteristiklerin çıkarılması için işlenmesi gerekmektedir. Sinyal işleme olarak adlandırılan bu süreç, veri toplama ünitesi vasıtasıyla gerçekleştirilen sinyal koşullamanın ardından verilerin bilgisayara transfer edilmesi ile başlamaktadır. Bilgisayar ortamında özel yazılımlar kullanılarak sinyal işleme süreci yürütülmektedir. Bilgisayara aktarılan veriler başlangıçta zaman alanında tanımlanmaktadır. Ancak işlem kolaylığı sağlaması ve hesaplama gereksinimleri nedeniyle veriler frekans tanım alanına Fourier serilerinden

faýdalanýlarak aktarılmaktadır. $x(t)$ ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında Denklem (1.14) ile ifade edilmektedir (Ramos, 2007).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.14a)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \quad (1.14b)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal verisi, t_k ($k=1, 2, 3, \dots, N$) ile ifade edilen sonlu bir zamana karşılık gelmektedir. Bu durumda sonlu sinyal Fourier serisine açıldığında Denklem (1.15) ile ifade edilmektedir.

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right] \quad (1.15a)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \quad (1.15b)$$

Deneysel çalışmalar sırasında, ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, ölçülen ham titreşim sinyallerinin depolanması, sinyal koşullama süreçlerinin yürütülmesi ve verilerin bilgisayar ortamına transfer edilmesinde PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Sinyal işleme ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde ise Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımından faydalanılmıştır.

1.7.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Alakalı Genel Esaslar

1940'lı yıllardan bu zamana kadar havacılık ve otomotiv gibi çeşitli alanlarda birçok çalışmada kullanılan DMA yöntemi, 1980'li yıllardan itibaren inşaat mühendisliği yapıları ile alakalı çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Chuntavan, 1993; Womack ve Halling, 1999; Achter, 2000; Zhao ve DeWolf, 2002; Ramos, 2007; Bayraktar vd., 2009; Altunışık vd., 2010; Sevim vd., 2011; Günaydın vd., 2017; Altunışık vd., 2018; Genç vd., 2019; Nasery vd., 2020; Sunca vd., 2021a). İnşaat mühendisliğinde DMA yönteminin her iki türü ÇTY ve ZTY aşağıdaki amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Sonlu eleman modeli kalibrasyon çalışmalarında,
- Hasar tespit çalışmalarında,
- Dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde,
- Yapısal bütünlüğün ve sağlığın izlemesinde,

DMA yöntemi ile yürütülen testlerde elde edilen sonuçların güvenilir olması için bazı temel koşulların sağlanması gerekir. Bunlar:

- DMA yöntemi ile gerçekleştirilen titreşim testleri sırasında, sıcaklık ve nem gibi etkiler nedeniyle seçilen yapının malzeme özelliklerinde ve sınır koşullarında değişimin meydana gelmediği varsayılır.
- Öte yandan yapının titreşim tepkilerinin küçük olduğu ve doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilir.
- Ele alınan yapının bir noktasından elde edilen yapısal davranışın bütün yapıyı yansıttığı, dolayısıyla yapının bir bütün ve sürekli olduğu varsayılır.

DMA yöntemiyle gerçekleştirilen titreşim testlerinin sağlıklı bir biçimde yürütülmesi ve ele alınan yapı hakkında doğru değerlendirmelerin yapılabilmesi için uygulamacının hem DMA yöntemi hem de yapısal davranış hakkında temel bilgilerine sahip olması gereklidir. Bu amaçla titreşim testleri gerçekleştirilirken aşağıda bahsedilen bazı önemli noktalar göz ardı edilmemelidir.

- Titreşim testleri gerçekleştirilecek yapının yapısal davranışı hakkında ön bilgilere sahip olunmalıdır. Bu amaçla, ölçümler öncesi oluşturulacak sonlu eleman modeli ile mod sayısı ve şekilleri, bu modlara karşılık gelen frekans değerleri yaklaşık olarak belirlenmelidir.
- Ele alınan yapı için Zorlanmış ve Çevresel titreşim yöntemlerinden en uygun olanı tercih edilmelidir.

- Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere yeterli kalitede verinin toplanabilmesi için uygun ivmeölçer türü ve yerleşim noktaları belirlenmelidir. Bu ivmeölçerler, konumlandırıldıkları noktaların titreşim tepkilerini ölçebildiklerinden hedeflenen mod şekillerini elde edebilecek biçimde, uygun sayıda teşkil edilmelidir. Bunların yanı sıra ivmeölçerlerin belirlenen noktalara uygun bir şekilde bağlanmalı ve ivmeölçerler dış etkilerden korunmalıdır.
- Titreşim testlerinde ele alınacak frekans aralığı ve hassasiyeti belirlenmelidir. Böylece, gereksiz ortam ve gürültü sinyallerinin ham titreşim verilerine olan etkileri azaltılır. Ayrıca, yeterli düzeyde kaliteli verinin toplanabilmesi için titreşim testlerinin süresi belirlenmelidir. Bu amaçla çeşitli araştırmacılara tarafından önerilen ölçüm süreleri Tablo 1.1’de sunulmuştur (Altunışık, 2010).

Tablo 1.1. Titreşim testleri için önerilen ölçüm süreleri

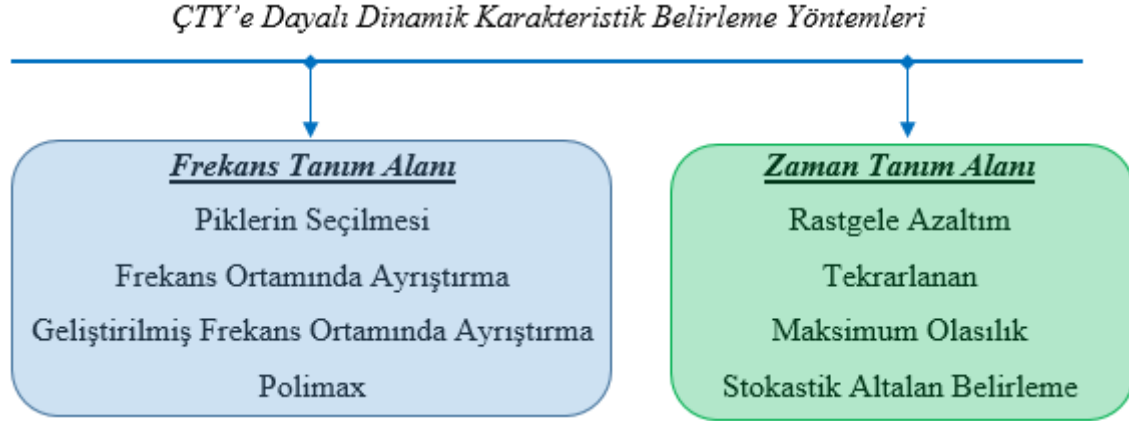
Araştırma	Ölçüm süresi
Bendat ve Piersol (1986)	Minimum 17dk
Caetano (2000)	Hakim titreşim periyodunun 240-1280 katı
Rodrigues (2004)	Hakim titreşim periyodunun 2000 katı
Ramos (2007)	10dk’dan az olmamak şartıyla hakim titreşim periyodunun 1000 katı

1.7.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Denklemler

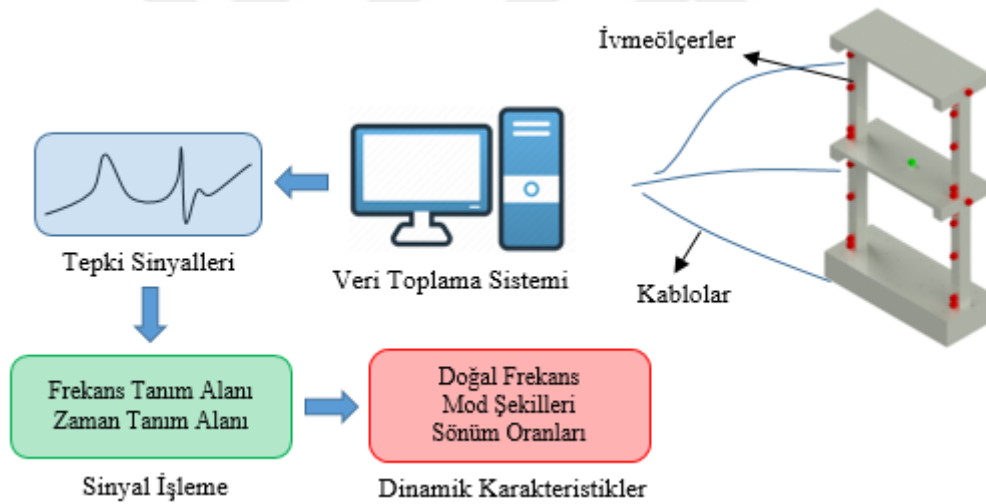
1.7.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Çevresel titreşim testlerinde doğal etkilerden kaynaklanan titreşimlerin dikkate alınması nedeniyle, bu titreşimin özellikleri ve zamanla değişimleri bilinmemektedir. Etki davranış fonksiyonunun elde edilememesi nedeniyle bu yöntem Operasyonel Modal Analiz gibi farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Yapıdan toplanan titreşim sinyalleri zaman veya frekans tanım alanındaki yöntemlerle işlenerek tepki davranış fonksiyonu elde edilir ve bu sayede dinamik karakteristikler belirlenir. Zaman veya frekans tanım alanındaki yöntemlerin birbirine kıyasla bir üstünlüğü bulunmamakta ve yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde her ikisine dayalı yöntemler kullanılabilir. Literatürde bu amaçla birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin bazıları Şekil 1.18’de sunulmaktadır.

Çevresel titreşim testleri ile yapısal davranışın belirlenmesini özetleyen akış şeması ise Şekil 1.19’da verilmiştir.



Şekil 1.18. Frekans ve zaman alanlarında dinamik karakteristik belirleme yöntemleri



Şekil 1.19. Çevresel titreşim testlerine ait akış şeması

Bu tez çalışmasında, her bir sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında deney numunelerine ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi ve deneysel yöntemlere dayalı hasar tespit çalışmalarının yürütülmesi amacıyla OMA (2006) yazılımında da mevcut olan ve literatürde sıklıkla kullanılan yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemi kullanılmıştır.

1.7.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi

Bu yöntem mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının belirlenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. GFO yönteminde, spektral yoğunluk fonksiyonu vasıtasıyla elde edilen tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki tepe noktalarının seçilmesiyle yapısal modlar belirlenir. Frekans Ortamında Ayırıştırma yöntemine kıyasla, GFOA yöntemi ile tanımlanan dinamik karakteristiklerin kesinliği artırılmakta ve sönüm oranları elde edilebilmektedir (Altunışık, 2010).

Bu yöntemde, belirli bir mod şekliyle ilişkili spektral tepe etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu, Ters Ayrık Fourier Dönüşümü'nden yararlanılarak zaman ortamına geri getirilir. Elde edilen oto-korelasyon tepki fonksiyonu tek serbestlik dereceli dinamik sistemin tipik bir tepkisine benzer olup, bu fonksiyonun logaritmik azalışıyla modal sönüm oranları ve korelasyon fonksiyonunun sıfır geçişleri arasındaki zaman aralıklarından doğal frekans belirlenmektedir. Ölçülemeyen etki kuvveti ile ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki Denklem (1.16) ile sunulmuştur (Bendat ve Piersol, 2004; Altunışık, 2010).

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) * G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.16)$$

Denklem (1.16)'da, $G_{yy}(j\omega)$ ve $G_{xx}(j\omega)$ tepki ve etki sinyallerinin GSY fonksiyonlarını, $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. * ve T üstel ifadeleri ise kompleks eşleniğini ve transpozisini ifade etmektedir. Bazı düzenlemelerin ardından tepki sinyalinin GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda Denklem (1.17)'deki gibi oluşturulur.

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.17)$$

Yukarıdaki denklemde, n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklem (1.16) yeniden düzenlenirse, bu ilişki Denklem (1.18)'deki gibi yazılabilir (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010; Sevim, 2010).

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{yy}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.18)$$

Denklem (1.18)'de, s tekil değerleri, $\bar{H}$ kompleks eşleniği ve transpozeyi göstermektedir. İfadeler sadeleştirildiğinde Denklem (1.18), tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda Denklem (1.19)'daki gibi ifade edilebilir (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010).

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.19)$$

A_k tepki tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k . artık değer matrisini temsil etmektedir. GFOA yönteminde ilk olarak GSY matrisi belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrıştırma matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010). Bu duruma göre Denklem (1.19), Denklem (1.20) ile ifade edilebilir.

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.20)$$

Denklem (1.20)'de, u_{ij} tekil vektörleri, $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_{ij} skaler tekil değerleri ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi ifade etmektedir. Denklem (1.20) ile sunulan tepki sinyallerinin GSY fonksiyonunda, tepeyi oluşturan noktalar yapının doğal frekansını göstermektedir. Tepe noktaları oluşturan tekil vektörler (u_{ij}) ise mod şekillerine karşılık gelmektedir (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010; Sevim, 2010).

1.7.3.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Bu yöntemde yapı, özellikleri bilinen bir dış kuvvet ile titreştirilmekte ve yapının bu etkiye karşı tepkisi ölçülmektedir. Bu yöntemde, yapay bir etki ile i noktasından uyarılan yapının bu etkiye karşı göstermiş olduğu tepki ($Y_k(t)$) ve yapay etki sinyali ($X_i(t)$) ölçülür. Bu yapay etki daha önceki bölümlerde bahsedilen titreştiriciler vasıtasıyla üretilir. Zaman

tanım alanında toplanan bu veriler Fourier serileri yardımıyla frekans tanım alanına dönüştürülür. Böylece etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren frekans davranış fonksiyonu H_{ik} yerini Transfer Matrisi $H_{ik}(i\omega)$ olarak ifade edilen frekans davranış fonksiyonu matrisine bırakır (Schwarz ve Richardson, 1999; Altunışık, 2010). Zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülen etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki Denklem (1.21) ile sunulmuştur.

$$H_{ik}(i\omega) = \frac{Y_k(\omega)}{X_i(\omega)} \quad (1.21)$$

Denklem (1.21)'de $X_i(\omega)$ ve $Y_k(\omega)$ frekans tanım alanındaki tepki ve etki fonksiyonlarını ifade etmektedir. Elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonu $H_{ik}(i\omega)$ farklı sayısal yöntemler ile ayrıştırılmakta ve yapının dinamik karakteristikleri çıkarılmaktadır.

1.8. Çevresel Titreşim Testlerine Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri

İnşaat mühendisliği yapıları servis ömürleri boyunca, çeşitli hasarlara, bozulmalara ve hatta çökmeye neden olabilecek doğal ve suni etkilere maruz kalırlar. Öngörülemeyen bir yapısal hasar, sadece can ve mal kayıpları açısından değil, aynı zamanda toplumsal etkiler açısından da kötü sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, yapısal hasar tespiti, özellikle erken hasar durumunda, ani göçmeleri önlemek ve yapıların güvenliğini sağlamak için oldukça önemlidir (Hou ve Xia, 2021).

Yapısal hasar tespiti çalışmaları, son yıllarda oldukça kapsamlı araştırmalarla yürütülmektedir. Rytter (1993), hasar tespitini dört seviye dikkate alarak sınıflandırmıştır:

- Seviye 1: hasar varlığının belirlenmesi,
- Seviye 2: hasar yerinin belirlenmesi,
- Seviye 3: hasar büyüklüğünün nicelleştirilmesi,
- Seviye 4: kalan hizmet ömrünün tahmini.

Yapısal hasar tespit yöntemleri, tahribatsız yöntemler ve titreşime dayalı yöntemler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. İlki, yapı elemanlardaki hasarları doğrudan hızlı bir şekilde tespit edemeyen yerel yöntemlerdir. Buna karşılık, titreşime dayalı hasar tespit yöntemleri, yapıdaki global titreşim özelliklerindeki değişimleri inceler ve bu nedenle yapı tamamının hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak vermektedir (Hou ve Xia, 2021).

Titreşime dayalı hasar tespit çalışmalarındaki amaç, titreşim testleri sonucunda elde edilen veriler arasındaki değişimin incelenmesi ile hasarın varlığı, konumu ve büyüklüğü gibi özelliklerin tespit edilmesidir. Bu süreçte, dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimler ele alınmaktadır. Çevresel titreşim testlerine dayalı başlıca hasar belirleme yöntemler (Doebbling vd., 1998; Okur, 2017):

- Doğal frekanslar ile gerçekleştirilen hasar tespiti,
- Mod şekilleri ile gerçekleştirilen hasar tespiti,
 - Modal Güvence Kriteri (MGK)
 - Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK)
 - Mod Şekli Eğrilik Yöntemi
- Esnekliğe bağlı olarak gerçekleştirilen hasar tespiti,
- Model kalibrasyonu ile yürütülen hasar tespiti,

olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında frekans değişimleri ile yürütülen hasar tespit çalışmalarının yanı sıra mod şekillerindeki değişimleri dikkate alan hasar tespit yöntemlerinden MGK ve KMGK yöntemleri kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, hasar tespit çalışmaları için gerçekleştirilen başlıca çalışmalar:

- Laboratuvar ortamında hazırlanan betonarme numunelerin başlangıç (hasarsız) dinamik karakteristiklerinin (mod şekli, frekans ve sönüm oranı) DMA yöntemi ile belirlenmesi,
- Farklı çarpışma türleri dikkate alınarak oluşturulan betonarme numunelerin, seçilen yer hareketleri altında sarsma masası deneylerinin gerçekleştirilmesi,
- Sarsma masası deneyleri sonrasında hasarlı dinamik karakteristiklerin DMA yöntemi ile tekrar belirlenmesi,
- Frekans değişimine, MGK ve KMGK yöntemleri ile hasar tespit çalışmalarının yürütülmesi,

olarak sıralanabilir.

1.8.1. Doğal Frekanslara Dayalı Hasar Tespiti

Araştırmacılar, yapı frekansındaki değişimlerin depreme maruz kalan binalardaki hasarı değerlendirmek için uygun bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir (DiPasquale ve Çakmak 1988; DiPasquale vd., 1990; Zembaty vd., 2006; Garcia vd., 2014). Salawu (1997),

bir yapının rijitliğindeki anormal kayıpların dolayısıyla hasarların doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için doğal titreşim frekansının %5.00 oranında değişmesi gerektiğini ifade etmiştir. Ancak, doğal frekanslar nem, sıcaklık gibi çevresel koşullardan oldukça etkilenmektedir. Dolayısıyla, bu yöntemle elde edilen değişimler ile mod şekilleri karşılıklı olarak incelenmeden hasarın varlığından açık bir şekilde söz edilemez. Bu yöntemde değişim oranı (Δ), hasarlı (f_d) ve hasarsız (f_u) durumdaki frekans değerleri kullanılarak Denklem (1.22)'de verilen bağıntı ile elde edilir.

$$\Delta = \left| \frac{f_d - f_u}{f_d} \right| \quad (1.22)$$

1.8.2. Mod Şekillerine Dayalı Hasar Tespiti

Hasarlı ve hasarsız durumda elde edilen modal yer değiştirmelerin kıyaslanması ile yürütülen birçok hasar tespit yöntemi mevcuttur. Tez çalışması kapsamında, mod şekillerindeki değişimleri baz alan MGK yönteminin yanı sıra hasarın ölçüm alınan noktaların hangilerinde yoğunlaştığı ortaya koyan KMGK yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntemler çeşitli inşaat mühendisliği yapılarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Ndambi vd., 2002; Perera vd., 2008; Altunışık vd., 2017; Altunışık vd., 2019b).

1.8.2.1. Modal Güvence Kriteri

Bu yöntem ile hasarlı ve hasarsız durumlarda yapıdan elde edilen modlara ait şekil vektörleri kıyaslanmaktadır. MGK değeri Denklem (1.23) kullanılarak elde edilir.

$$MGK(i, j) = \frac{|\phi'_{xi} \cdot \phi_{aj}|^2}{(\phi'_{xi} \cdot \phi_{xi}) \cdot (\phi'_{aj} \cdot \phi_{aj})} \quad (1.23)$$

Burada, ϕ_{xij} ve ϕ_{aij} farklı hasar durumlarında elde edilen mod şekil vektörlerinin ifade etmektedir. $MGK(i, j)$ değeri elde edilen mod şekillerinin ne derece benzer olduklarını göstermektedir.

Dikkate alınan tüm mod şekillerinden elde edilen MGK değerleri kullanılarak bir matris oluşturulur. MGK değerinin 1.00'e yakın olması farklı durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliğin iyi olduğu anlamına gelmektedir.

1.8.2.2. Koordinat Modal Güvence Kriteri

MGK yönteminde hasarlı ve durumlarda elde edilen mod şekillerinin genel benzerliği dikkate alınırken, KMGK yönteminde ise ölçüm alınan tüm noktalardaki modal yer değiştirmeler arasındaki ilişki ele alınmaktadır. Daha farklı bir biçimde ifade edilecek olursa, KMGK yöntemi dikkate alınan korelasyonun MGK yöntemindeki gibi mod sayılarından ziyade yapının serbestlik dereceleriyle ilgili olacak şekilde geliştirilmiştir. Bu nedenle, hesaplanan KMGK değerleri, yapı içindeki hasarın veya homojensizliğin nerede meydana geldiğini göstermede önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Ancak araştırmacılar her iki yönteminde, hasarı erken evrelerde tespit edecek kadar hassas olamayabileceğini ifade etmişlerdir (Radzieński vd., 2011).

KMGK değeri Denklem (1.24) kullanılarak elde edilir.

$$KMGK(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{aij}| \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{xij}| \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{aij} \cdot \phi_{aij}| \right)} \quad (1.24)$$

Burada, ϕ_{xij} ve ϕ_{aij} farklı hasar durumlarında elde edilen mod şekil vektörlerinin i.ci düğüm noktası modal yer değiştirme değerini, N_m ise dikkate alınan mod şekli sayısını ifade etmektedir.

Elde edilen KMGK değerinin 1.00'e yakın olması dikkate alınan hasar durumlarına ait mod şekillerinin ilgili ölçüm noktasında örtüştüğünü, sıfıra yakın olması mod şekillerinin örtüşmediğini ve ilgili ölçüm noktasında hasarın varlığını ifade etmektedir. Okur (2017) bazı durumlarda KMGK değerlerinde artan hasarla birlikte meydana gelen azalmaların oldukça küçük olması nedeniyle hatalı değerlendirmeler yapmamak ve hasarın meydana geldiği ölçüm noktasının açık bir biçimde tespit edilmesi için verileri 1-KMGK değerleri üzerinden

karşılaştırmıştır. Dolayısıyla 1-KMGK değerin artması hasarın ilgili ölçüm noktasında oluştuğunu ifade etmektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu çalışmada, ölçekli betonarme bina modelleri kullanılarak sarsma masası üzerinde gerçekleştirilecek deneyler ile birlikte binaların farklı çarpışma türleri için çarpışma davranışlarının belirlenmesi, çarpışma sonrası oluşacak hasarların binaların performanslarına olan etkilerinin deneysel yöntemler kullanarak incelenmesi ve çarpışma etkilerini azaltmak için kullanılabilecek uygun yöntemlerin önerilmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen amaçlar doğrultusunda, ilk olarak deneyler sırasında dikkate alınacak çarpışma türlerine, deney numunelerine ve ölçeklendirme kurallarına ait detaylar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Deney numunelerinin üretimine ve üretim sırasında kullanılan malzeme özelliklerinin tayini için gerçekleştirilen malzeme deneylerine ait bazı bilgiler de bu bölümde verilmiştir. Çarpışma deneyleri için üretilen deney düzeneği ve sarsma masası deneylerinde ve çevresel titreşim testlerinde kullanılacak cihazlar tanıtılmıştır. Çalışmanın hedeflerine ulaşma konusunda önemli bir yeri olan yer hareketi seçimi ve ölçeklendirilmesine ait detaylar da bu bölümde irdelenmiştir.

Statik ve yarı-statik çevrimsel testlere kıyasla, sarsma masası deneylerinde test süresinin oldukça kısa olması ve numune üretimi, kullanılan cihazların temini vb. adımların maliyetlerinin yüksek olması bu tip dinamik deneyler öncesi yapılacak hazırlıkların ve kontrollerin önemini artırmaktadır. Bu aşamada yapılacak hazırlıklar ve kontroller, istenilen yapısal tepkilerin elde edilmesi ve deneyin amacına ulaşması açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla numunelerin tasarımından sarsma masası deneylerinin gerçekleştirilmesine kadarki tüm işlem adımları doğru bir şekilde yürütülmelidir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında, deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin, deneyler sırasında kullanılan ölçüm sistemlerinin ve deneyler sırasında elde edilen yapısal tepkilerin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla pilot sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Pilot deneyler sonucunda üretilen deney düzeneğinde bir takım değişiklikler yapılarak komşu binalar arasındaki çarpışma davranışının incelendiği esas sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.2. Deneysel Program

Komşu binalar arasındaki çarpışma birçok şekilde gerçekleşebilmekte ve çarpışmalar sadece en üst katlarda değil orta katlarda da meydana gelebilmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde, bina türü yapılar için çarpışma çeşitleri 5 grupta toplanmıştır:

- Biri diğerine göre daha ağır olan binaların çarpışması (döşeme-döşeme etkileşimi)
- Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması (kolon-döşeme etkileşimi)
- Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması (döşeme-döşeme etkileşimi)
- Burulma davranışı nedeniyle meydana gelen noktasal çarpışma
- Aynı zamanda ikiden fazla binanın çarpışması

Bunlara ek olarak köprü tabliyelerindeki genleşme derzlerinde de çarpışmaların meydana gelebildiği ve bu çarpışmalar sonucu köprü kirişlerinin yuvalarından çıkabildiği ve tabliyelerde hasarların meydana gelebildiği geçmiş yıllardaki depremler de gözlemlenmiştir (Muthukumar, 2003; Çetinkaya, 2011). Meydana gelen her bir çarpışma türünün yapılarda farklı hasarlara sebep olabileceği, bazı çarpışma türlerinde yapısal hasarların daha belirgin hale gelebildiği ve binaların tamamen göçmesine sebep olabileceği görülmüştür. Bu sebeple deneyler sırasında dikkate alınacak çarpışma türleri çalışmanın amacına ulaşması açısından büyük öneme sahiptir. Bu tez kapsamında, depremler sonrası en çok karşılaşılan ve en yıkıcı etkilere sahip çarpışma türlerinden, biri diğerine göre daha ağır olan binaların çarpışması, kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması ve farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türleri kullanılmıştır.

Komşu binalar arasındaki çarpışma davranışını incelemek amacıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne, alt yapı projesi kapsamında kazandırılan ve Ülkemizdeki büyük kapasiteli masalardan bir tanesi olan 4.00×4.00m'lik boyutlara sahip tek eksenli sarsma masası kullanılmıştır. Detayları ileri bölümlerde verilen bu sarsma masasının düşey yük kapasitesi ve uygulayabildiği ivme aralığı birçok yapı türünün çeşitli sismik yükler altında incelenmesine olanak sağlamaktadır. Geçmiş yıllarda yapıların sismik tepkilerini incelemek amacıyla sarsma masası deneylerinde araştırmacılar tarafından hem düzlem çerçeve hem de üç boyutlu deney numuneleri kullanılmıştır (Sharma vd., 2012; Stavridis vd., 2012; Li vd., 2016; Garcia vd., 2017; Zhang vd., 2017; Ahmad vd., 2019; Khan vd., 2021). Crozet vd. (2019) sarsma masası ile gerçekleştirdikleri çarpışma deneylerinde biri diğerine göre daha ağır olan üç boyutlu çelik taşıyıcı sisteme sahip yapılar kullanmışlardır. Sismik etkinin uygulandığı doğrultudaki

yapısal tepkileri incelenmeye çalışmalarına rağmen, deneyler sırasında her iki yapıdaki çarpışma yüzeylerinin tam olarak paralel olmaması nedeniyle beklenmeyen burulma tepkilerinin meydana gelebileceğini ortaya koymuşlardır. Chau vd. (2004), çarpışma deneyleri ve analitik çalışmalar ile yapılarıdaki burulmanın binalar arasındaki çarpışmaya olan etkilerini araştırmış ve burulma davranışının binalarda yapısal tepkileri önemli ölçüde artırabileceğini tespit etmişlerdir. Dolayısıyla, betonarme deney numunelerinin üretimi sırasında oluşabilecek imalat hataları ve numunelerin sarsma masası üzerine yerleştirilmesi sırasında hareket doğrultusuna tam olarak paralel yerleştirilememesi deneylerde beklenen yapısal tepkilerin dışında burulma davranışının meydana gelmesine neden olabilecektir. Bu durumu engellemek amacıyla deneylerde betonarme düzlem çerçeve deney numunelerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

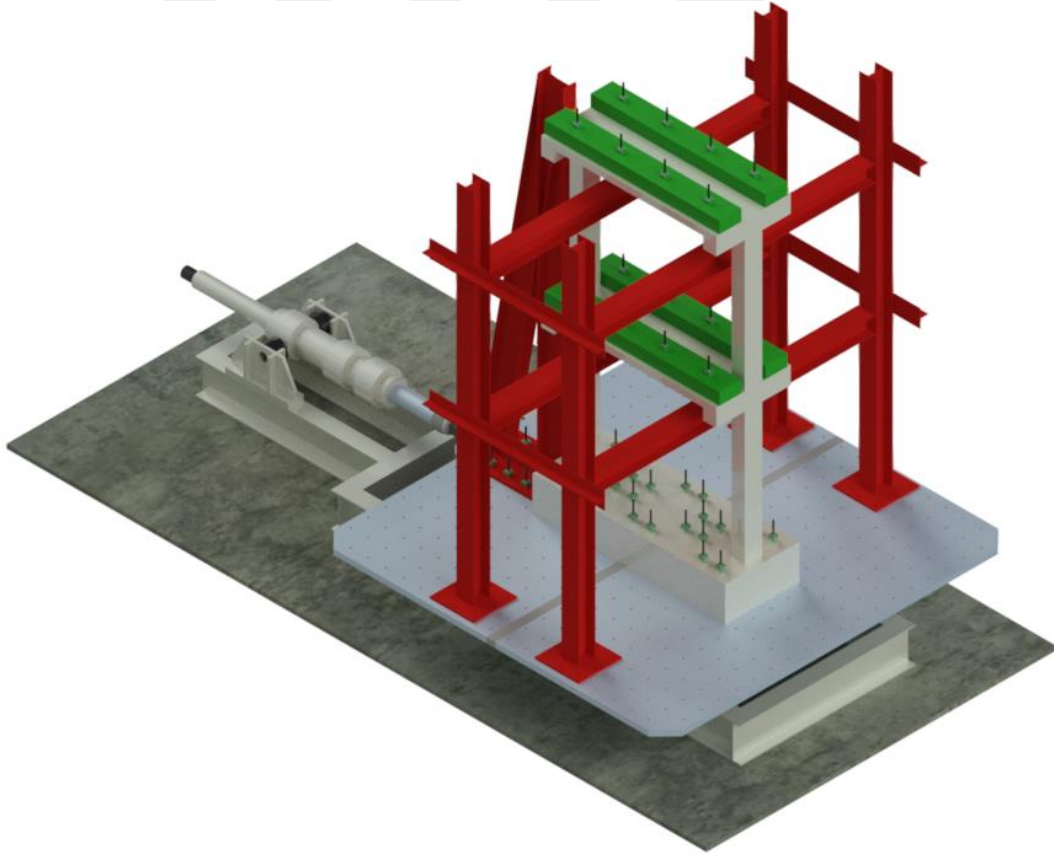
Komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerinin sayısal ve deneysel olarak incelendiği literatürdeki çalışmalarda, çoğunlukla komşu binalardan biri esnek diğeri rijit olarak dikkate alınmıştır. Ancak iki bina modelinin sarsma tablasındaki davranışının değerlendirilmesi oldukça karmaşık bir konudur. Bu durumu aşmak için rijit binayı temsil etmek amacıyla detayları daha sonraki bölümlerde sunulan rijit bir çarpışma duvarı inşa edilmiştir. Bu deney prosedürüne benzer şekilde, komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerini incelemek amacıyla rijit çarpışma duvarının veya ağırlık düşürme düzeneklerinin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur (Kharazian vd., 2018; Makita vd., 2018). Ayrıca deneyler sırasında, betonarme çerçevelerin düzlem dışı hareketlerinin önlenmesi için rulman sistemi oluşturulmuş olup, olası göçme durumlarına karşı çelik bir koruma çerçevesi inşa edilmiştir. İnşa ettirilen çarpışma duvarına, çarpışma elemanına, rulman sistemine ve koruma çerçevesine ait detaylar ve görseller daha sonraki bölümlerde sunulmuştur.

Tez kapsamında 5 adet betonarme deney numunesi kullanılarak sarsma masası deneylerinin yürütülmesine karar verilmiştir. Çarpışma deneyleri için takip edilen deney organizasyonunun ana hatları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

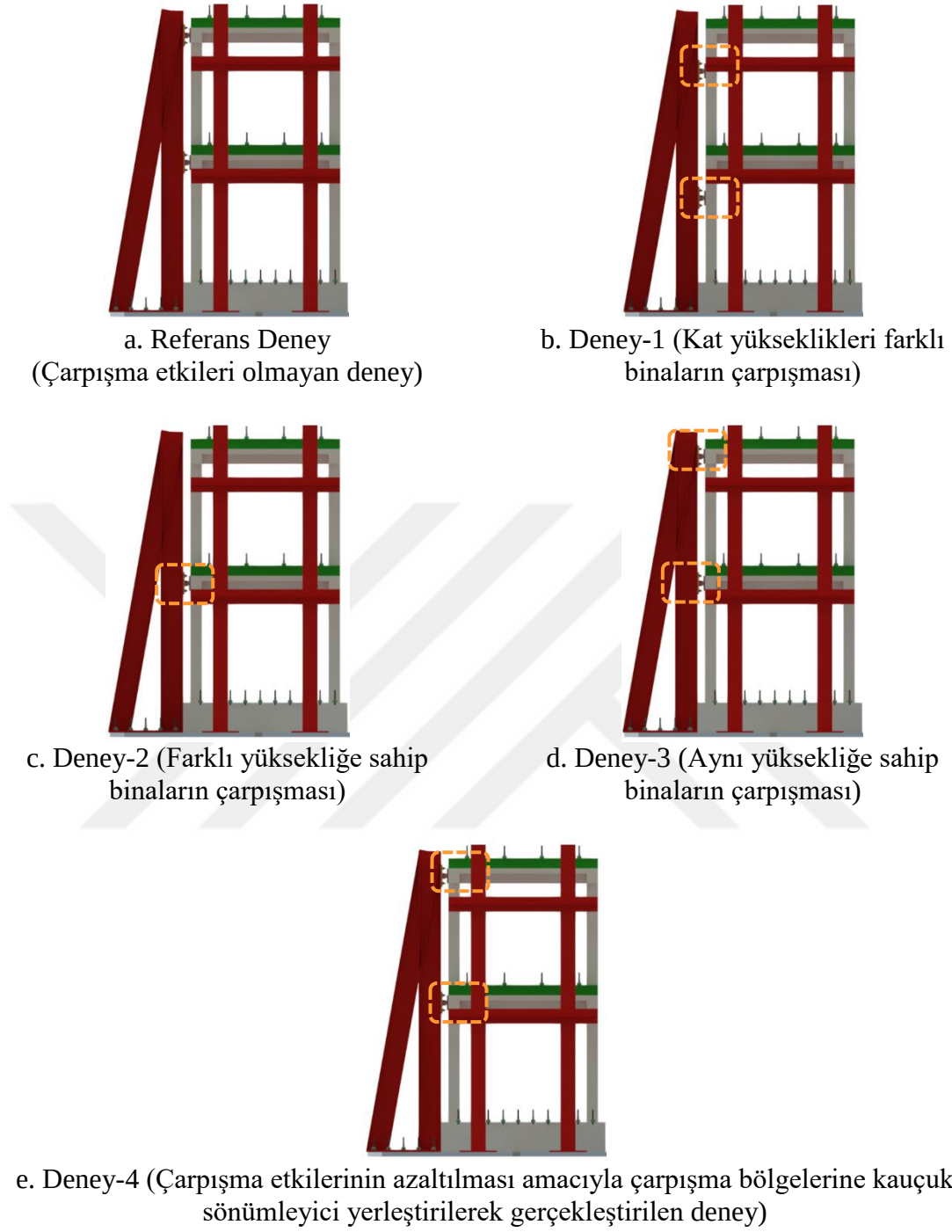
- Referans Deney: Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı durumda gerçekleştirilecek sarsma masası deneyleridir.
- Deney-1 (Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması): Deney numunesi ile rijit çarpışma duvarı arasındaki döşeme-kolon çarpışması etkilerinin inceleneceği sarsma masası deneyleridir.

- Deney-2 (Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması): Tek bir katta meydana gelen döşeme-döşeme çarpışmasının yapısal davranış ve hasar mekanizması üzerindeki etkilerinin araştırıldığı deneylerdir.
- Deney-3 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması): Deney numunesi ile rijit çarpışma duvarı arasındaki her iki katta döşeme-döşeme etkileşiminin neden olduğu yapısal tepkilerin ve hasarların incelendiği sarsma masası deneyleridir.
- Deney-4: Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk sönümleyiciler teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneyleridir.

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de tez kapsamında sarsma masası deneylerinde kullanılan deney düzeneğine ve dikkate alınan her bir çarpışma türü için deney numunelerine ait şematik görünümeler sunulmuştur.



Şekil 2.1. Deney düzeneğine ait şematik gösterim



Şekil 2.2. Dikkate alınan her bir çarpışma türü için çarpışma bölgelerine ait şematik görünüm

2.3. Deney Numunelerine Ait Geometrik Özellikler ve Üretim

Deney numunelerine ait özellikler ve ölçek katsayısı belirlenirken, çarpışma testlerinin gerçekleştirileceği sarsma masasının özellikleri ve laboratuvar koşulları dikkate alınmıştır.

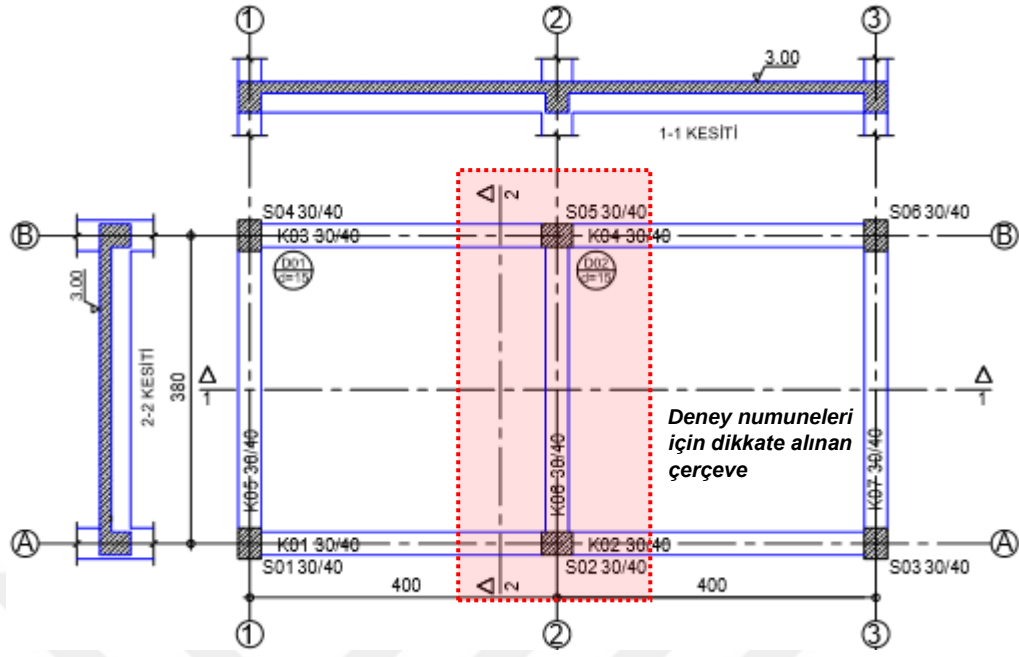
Üretilcek deney numunelerinin detaylandırılmasında, tasarımı ve hesabı gerçekleştirilen tam ölçekli bir bina modeli kullanılmıştır (Stavridis vd., 2012; Ahmad vd., 2019). Bu kapsamda, bina modeli ölçeklendirme yasalarına göre ölçeklendirilmiş ve ölçek katsayısı olarak 1/2 seçilmiştir. Laboratuvar koşulları nedeniyle kat yüksekliği 3.0m olan 2 katlı ve 2 açıklıklı bina modeli dikkate alınmıştır. Tam ölçekli bina modeline ait plan ve cephe görünüşleri Şekil 2.3’de verilmiştir. Sarsma masası deneylerinde iki boyutlu numunelerin kullanılması nedeniyle, deney numunelerinin tasarımında tam ölçekli bina modelinin orta açıklığındaki taşıyıcı çerçeve kullanılmıştır.

Tam ölçekli bina modelinin tasarımında, Ülkemizin kentsel yapı stokunun büyük çoğunluğunu oluşturan betonarme binaları temsil etmek amacıyla sıklıkla karşılaşılan yetersizlikler dikkate alınmıştır. Bu tez kapsamında dikkate alınan yetersizlikler ve tasarım hataları:

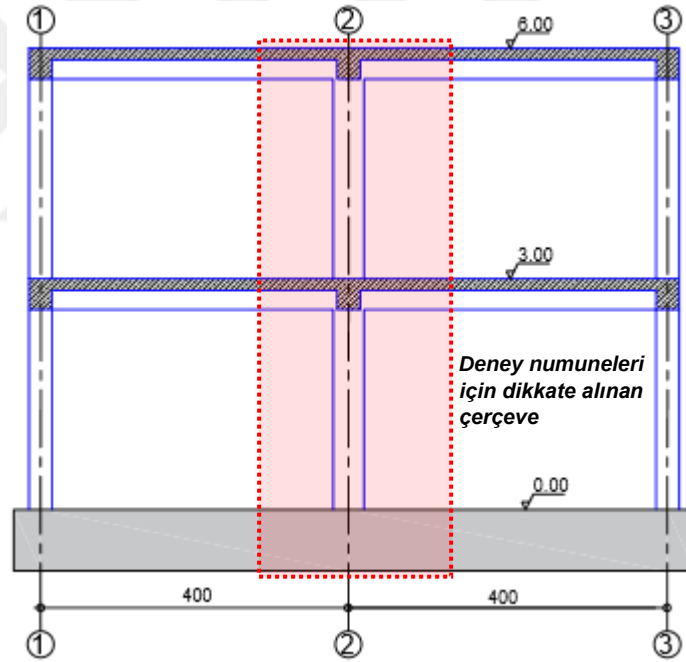
- Düşük beton dayanımı,
- Yetersiz sargı donatısı,
- Birleşim bölgelerinde sıklaştırma yapılmaması,

olarak sıralanabilir.

Betonarme yapıların performanslarını olumsuz yönde etkileyen bu kusurlar sayesinde Ülkemiz yapı stokunun büyük çoğunluğunu oluşturan zayıf yapılar temsil edilmeye çalışılmıştır. Mevcut binaları temsil eden deney numuneleri için beton sınıfı C12/15 ($f_{ck}=12\text{MPa}$) olarak dikkate alınmıştır. Mevcut yapı stokumuzun önemli bir bölümü 1975 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1975, 1975) esaslarına göre tasarlanmış ve bu yapılarda genellikle karakteristik akma dayanımı 220MPa olan nervürlü S220 donatı çeliği kullanılmıştır. Ancak ABYYHY-1975 esaslarına göre, karakteristik akma dayanımı 420MPa olan S420 donatı çeliği de betonarme binaların tasarımında tercih edilebilmektedir. Dolayısıyla, deney numunelerinin üretimi sırasında S220 donatı çeliğinin temininde yaşanan zorluklar nedeniyle tam ölçekli binanın tasarımında donatı sınıfı S420 ($f_{yk}=420\text{MPa}$) olarak dikkate alınmıştır.



a. Plan görünüşü



b. Cephe görünüşü

Şekil 2.3. Tam ölçekli bina modeline ait görüşler ve deney numunelerinin tasarımında dikkate alınan çerçeve

2.3.1. Deney Numunelerinin Ölçeklendirilmesi

Sarsma masası deneyleri, yapay veya gerçek yer hareketleri altında mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının gerçekçi bir şekilde araştırılmasına olanak veren dinamik

bir deney yöntemidir. Ancak deneylerin gerçekleştirileceği sarsma masasının özellikleri ve laboratuvar koşulları çoğu zaman ölçekli deney numunelerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle sarma masası ile gerçekleştirilecek deneylerde hedeflenen amaçlara ulaşılabilmesi ve uygun yapısal davranış için uygun ölçeklendirme yönteminin seçilmesi önemlidir. Özellikle bu tez çalışmasının da konusu olan betonarme yapıların deprem yükleri altında davranışlarını belirlerken dikkate alınan ölçeklendirme katsayıları, kaydedilen verilerin güvenilirliği açısından önemli bir parametredir (Birdal, 2015).

Sarsma masası deneylerinde, incelenecek yapısal davranışa ve özelliğe bağlı olarak çeşitli ölçeklendirme yöntemleri ve ölçeklendirme katsayıları bulunmaktadır. Harris ve Sabnis (1999) bu tip deneylerde kullanılabilecek ölçeklendirme yöntemlerini aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

- Gerçek kopya model
- Yapay kütle benzeştirmesi modeli
- Yerçekimi etkilerinin ihmal edildiği prototip malzeme modelidir.

Bu tez kapsamında ölçek katsayısı olarak 1/2 seçilmiş olup deney numunelerinin ölçeklendirilmesinde yapay kütle benzeştirmesi modeli (artificial mass model) olarak adlandırılan ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır. Tam ölçekli bina modelinden deney numunelerinin detaylandırılması sırasında Tablo 2.1’de verilen ölçeklendirme katsayıları kullanılmıştır (Karayel, 2016; Zhang vd., 2017). Bu yaklaşımda, beton ve çelik için gerilme ölçek faktörü 1.0 olarak dikkate alınmaktadır. Bu nedenle yapay kütle benzeştirmesi modeli, diğer ölçeklendirme modellerinin aksine gerçek bina ve ölçekli bina modelinde aynı malzemelerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle tüm deney numuneleri için malzeme açısından herhangi bir ölçeklendirme yapılmamıştır. Bir diğer önemli husus ise Tablo 2.1’den de görüleceği üzere deneylerde kullanılan yer hareketi verisinin ivme ölçeği “1.0” olarak dikkate alınırken, yer hareketi verisinin zaman eksenli ölçek katsayısının karekökü ile ölçeklendirilmektedir. Bu şekilde ölçeklendirilen yer hareketi verisinin sayısal integrasyonu yapıldığında, elde edilecek en büyük yer değiştirme ve hız değerleri ölçeklendirilmemiş yer hareketininkine kıyasla daha küçük olacaktır. Bu durum, sarsma masasının kapasitesi açısından olumlu bir etki yaratarak birçok deprem verisinin deneylerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

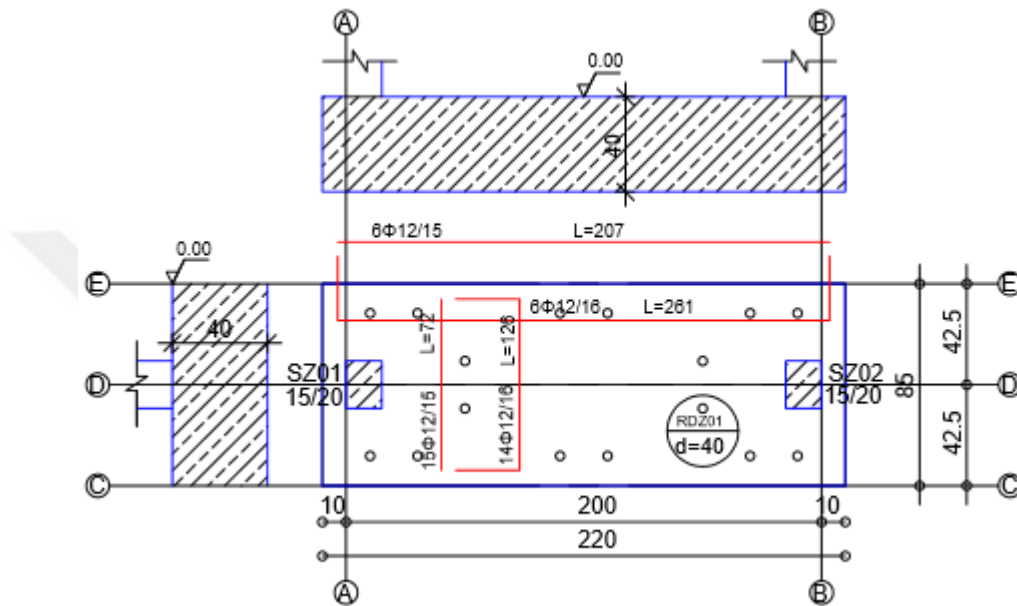
Tablo 2.1. Deneylerde çeşitli büyüklükler için dikkate alınan ölçek katsayıları (λ)
(Karayel 2016; Zhang vd., 2017)

Nicelik	Sembol	Yapay Kütle Benzeştirme Modeli	Ölçek Katsayısı ($1/\lambda$)
Uzunluk	l	λ_l	1/2
Elastisite Modülü	E	λ_E	1.0
İvme	a	$\lambda_a = 1/\lambda_l \lambda_E/\lambda_\rho$	1.0
Hız	v	$\lambda_v = (\lambda_l \lambda_a)^{1/2}$	1/ $\sqrt{2}$
Kuvvet	F	$\lambda_f = \lambda_E \lambda_l^2$	1/4
Gerilme	σ	$\lambda_\sigma = \lambda_E$	1.0
Şekil Değiştirme	ε	$\lambda_\varepsilon = 1.0$	1.0
Poisson Oranı	ν	$\lambda_\nu = 1.0$	1.0
Alan	A	$\lambda_A = \lambda_l^2$	1/4
Hacim	V	$\lambda_V = \lambda_l^3$	1/8
Atalet Momenti	I	$\lambda_I = \lambda_l^4$	1/16
Yoğunluk	ρ	$\lambda_\rho = \lambda_E/(\lambda_l \lambda_a)$	2.0
Kütle	m	$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_l^3$	1/4
Enerji	e	$\lambda_e = \lambda_E \lambda_l^3$	1/8
Zaman	t	$\lambda_t = (\lambda_l \lambda_a)^{1/2}$	1/ $\sqrt{2}$
Frekans	ω	$\lambda_\omega = 1/\lambda_l/(\lambda_E \lambda_\rho)^{1/2}$	1/(2) ^{-0.5}
Sönüm	ζ	$\lambda_\zeta = 1.0$	1.0
Yerçekimi İvmesi	g	$\lambda_g = 1.0$	1.0

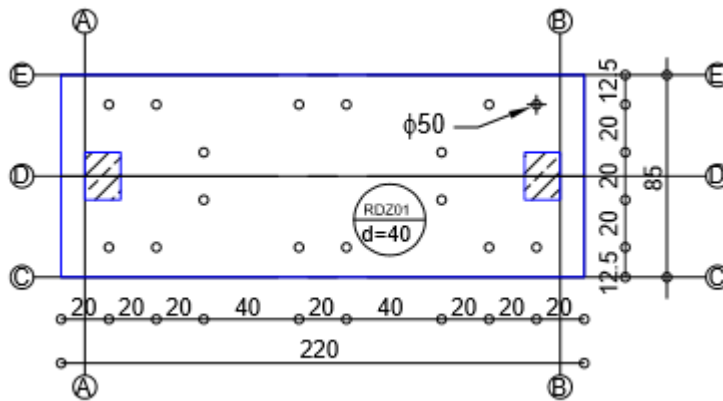
2.3.2. Deney Numunelerinin Detaylandırılması

Bu bölümde, tam ölçekli bina modelinden yola çıkarak detaylandırılan ve ölçeklendirilen deney numunelerine ait en kesit detayları ve statik çizimler sunulmuştur. Bu bölümde sunulan detaylar ve çizimler dikkate alınan tüm deney numunelerinde aynıdır. Deney numunelerinde temel eni, boyu ve kalınlığı sırasıyla 0.85m, 2.20m ve 0.40m'dir. Temelin üst ve altında kullanılacak donatılar 10.00cm aralık ile 12.00mm çapında elde edilmiştir. Temel üzerinde 16 farklı noktada 50.00mm çapında borular konularak, modelin sarsma masası üzerine sabitlenmesinde kullanılacak bağlantı elemanları için boşlukların bırakılması amaçlanmıştır. Modelin imalatının ardından yerinden kaldırılması ve sarsma masası üzerine yerleştirilmesi işlemleri için 16mm çapında donatılardan kancalar imal edilerek temel donatısına teşkil edilmiştir. Bu amaçla deney numunelerinin her birinde 4

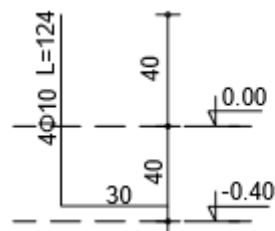
adet demir kanca temele yerleştirilmiştir. Temeldeki üst donatıları yerine sabitleyebilmek için her bir temelde 4 adet sehpa donatısı düşünülmüştür. Kolon filizleri, kolon aplikasyon planına uygun olarak temellere yerleştirilmiş ve temel içinde kalan kısımda bu donatılara üçer adet etriye teşkil edilmiştir. Temel aplikasyon planına, donatı detaylarına, bağlantı elemanlarına ait detaylar Şekil 2.4 ile sunulmuştur.



a. Temel aplikasyon planı



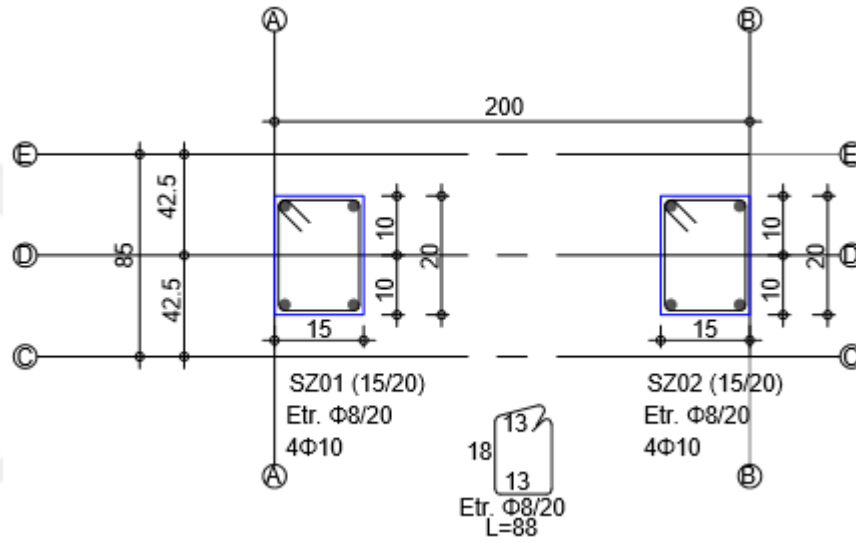
b. Sarsma masası bağlantı detayları



c. Kolon filizleri ve sehpa donatılarına ait detaylar

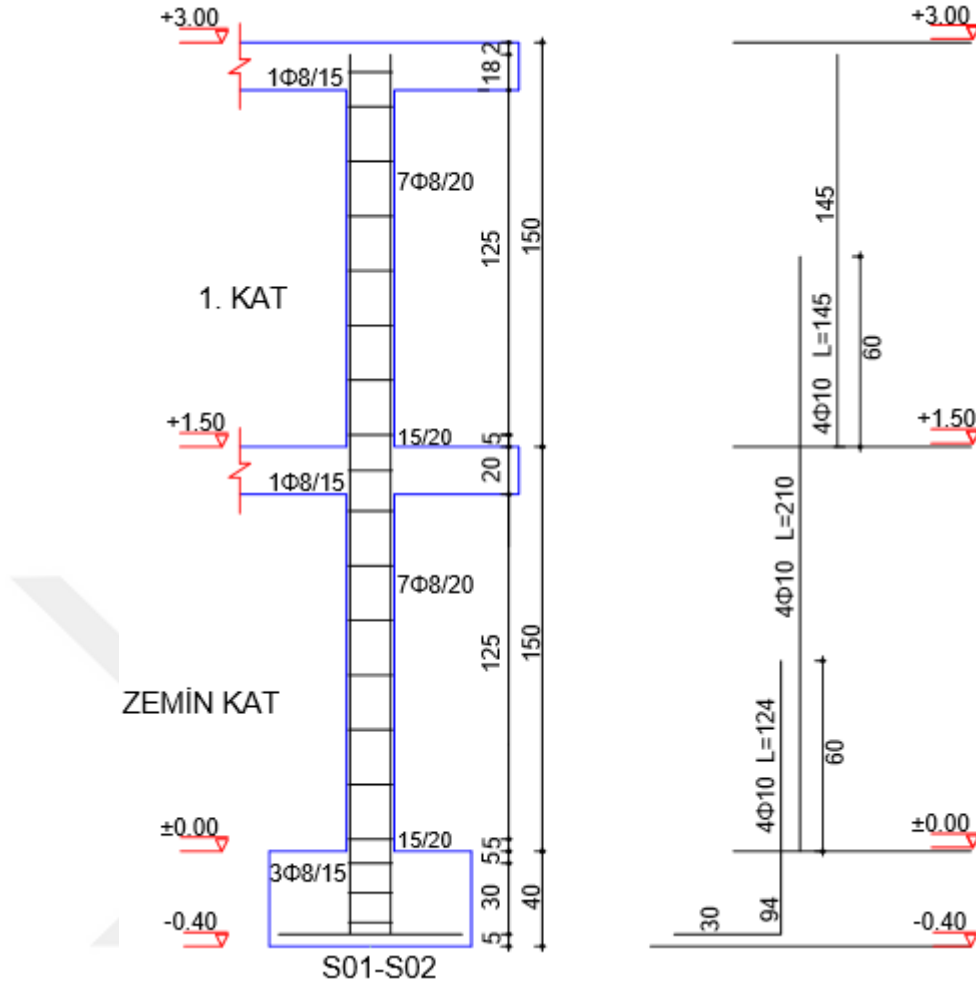
Şekil 2.4. Temel aplikasyon planı, sarsma masası bağlantı ve temel donatı detayları

Betonarme düzlem çerçeve deney numunelerinde ölçeklendirme sonucu kolon boyutları tüm katlarda 15.00×20.00cm olarak belirlenmiştir. Laboratuvar koşullarında hasarların daha erken yükleme adımlarında gözlenebilmesine olanak vermek amacıyla kolonlar daha az rijitliğe sahip oldukları kısa doğrultuda yükleme yapılacak şekilde yerleştirilmiştir. Bütün kolonlarda 4φ10 nervürlü boyuna donatı ve φ8/20 nervürlü enine donatı kullanılmıştır. Deney numunelerine ait kolon aplikasyon planı Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Kolon aplikasyon planı

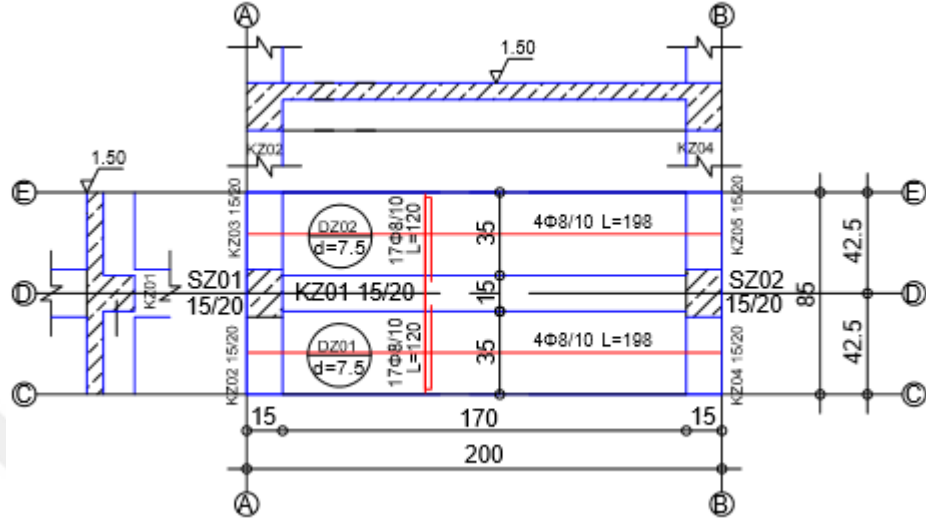
Kolon-kiriş birleşim ve kolon sıkılaştırma bölgelerinde mevcut yapı stokunu temsil etmek amacıyla etriye sıkılaştırması yapılmamıştır. Kolonlarda, temellerden çıkacak olan kolon filizlerine teşkil edilen etriyelerle birlikte 19 adet φ8'lik sargı donatısı kullanılmıştır. Kolonlarda pas payı olarak 12.50mm dikkate alınmıştır. Deney numunelerinin tamamında kolon yükseklikleri temel üst yüzeyinden döşeme üst yüzeyine kadar 1.50m'dir. Kolon donatılarına ait detaylar (boyuna donatı ölçüleri, gönye detaylandırmaları, filiz uzunlukları, vb.) kolon düşey açılımları ile Şekil 2.6'da sunulmuştur. Kolon boyuna donatıları gerçekte yapılan imalata benzer şekilde temelde ve kat seviyelerinde filizler bırakılacak şekilde detaylandırılmıştır. Bindirme bölgelerinde oluşabilecek aderans kayıplarının deney sonuçlarını etkilemesini önlemek amacıyla bindirme uzunluğu ölçeklendirme sonucu elde edilen değerden daha fazla olarak dikkate alınmıştır. Hem 1.kat hem de 2. kat kolonları için bindirme boyu 60.00cm olarak dikkate alınmıştır.



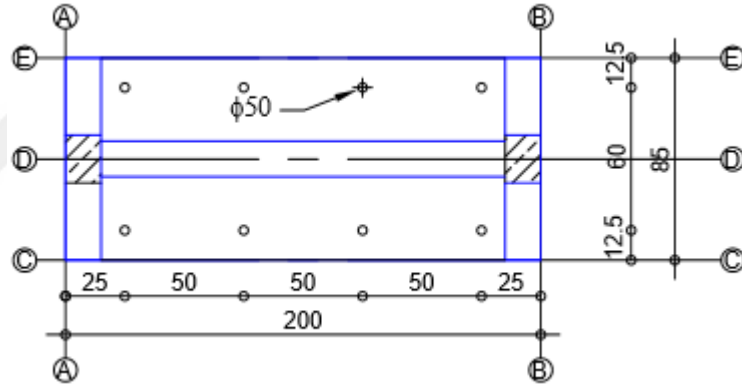
Şekil 2.6. Kolon düşey açılımları

Deney numunelerine ait kalıp planı Şekil 2.7’de sunulmuştur. Kalıp planı tüm katlarda ve tüm numunelerde aynı olması sebebiyle sadece bir katın kalıp planı verilmiştir. Tam ölçekli bina modelinde döşeme kalınlıklarının 15.00cm olması sebebiyle ölçeklendirme sonucunda deney numunelerinin döşeme kalınlığı 7.50cm olarak elde edilmiştir. Deney numunelerinin ölçeklendirilmesinde yapay kütle benzeştirmesi modeli kullanılması nedeniyle deneyler sırasında her bir kata ilave kütleler teşkil edilmiştir. Bu kütlelerin kat seviyelerine sabitlenebilmesi için her iki kenardan 35.00cm çıkmalar dikkate alınmıştır. Böylece deney numuneleri planda 0.85×2.00m boyutlarında tasarlanmıştır. Döşeme üzerinde 8 farklı noktada 50.00mm çapında borular konularak, ilave yüklerin deney numunesi üzerine sabitlenmesinde kullanılacak bağlantı elemanları için boşlukların bırakılması amaçlanmıştır. Kalıp planı, döşeme donatı detayları, bağlantı elemanlarına ait

detaylar Şekil 2.7 ile sunulmuştur. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te deney numunelerine ait beton ve donatı metrajları verilmiştir.



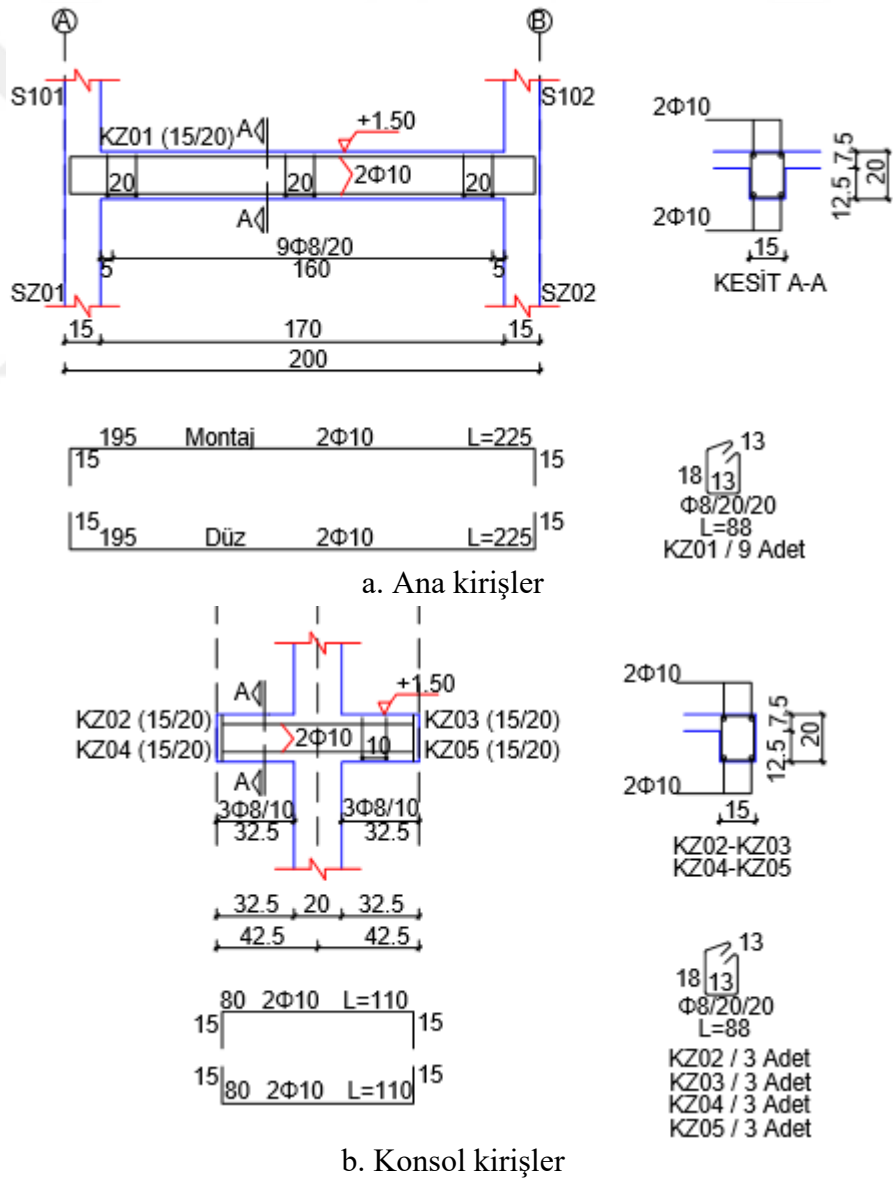
a. Kalıp planı



b. İlave yük bağlantı detayı ve şematik gösterimi

Şekil 2.7. Kalıp planı, ilave yük bağlantı detayları ve döşeme donatı detayları

Deney numunelerinde ölçeklendirme sonucu kiriş boyutları 15.00×20.00cm olarak elde edilmiştir. Bütün kirişlerde boyuna donatı olarak altta ve üstte 2φ10'luk nervürlü donatılar kullanılmıştır. Kirişlerde enine donatı olarak 8.00mm çapında nervürlü donatı 20.00cm aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Sarsma masasının hareket doğrultusuna paralel olan ana kirişlerde 9 adet, diğer konsol kirişlerde ise 3'er adet enine donatı kullanılmıştır. Kolonlara benzer şekilde mevcut yapı stoğumuzu temsil etmek amacıyla sıklaştırma bölgelerinde etriye aralıkları azaltılmamıştır. Kirişlerde pas payı olarak 12.50mm dikkate alınmıştır. Kirişlere ait donatı detayları Şekil 2.8'de verilmiştir. Şekil 2.8'de tüm katlarda kiriş detaylarının aynı olması sebebiyle sadece 1. kat kiriş detayları sunulmuştur.



Şekil 2.8. Kiriş donatı detayları

Tablo 2.2. Deney numunelerine ait beton metraji

Açıklama	Beton Metraji				Toplam
	En	Boy	Kalınlık	Benzeri	
Temel	0.85	2.20	0.40	5.00	3.740
1. Kat Döşeme	0.35	1.70	0.07	5.00	0.208
	0.35	1.70	0.07	5.00	0.208
2. Kat Döşeme	0.35	1.70	0.07	5.00	0.208
	0.35	1.70	0.07	5.00	0.208
1. Kat Kolon	0.15	0.20	1.50	5.00	0.225
	0.15	0.20	1.50	5.00	0.225
2.Kat Kolon	0.15	0.20	1.50	5.00	0.225
	0.15	0.20	1.50	5.00	0.225
1. Kat Kiriş	0.15	1.70	0.20	5.00	0.255
	0.15	0.33	0.20	5.00	0.049
	0.15	0.33	0.20	5.00	0.049
	0.15	0.33	0.20	5.00	0.049
	0.15	0.33	0.20	5.00	0.049
2. Kat Kiriş	0.15	1.70	0.20	5.00	0.255
	0.15	0.33	0.20	20.00	0.196
Toplam (m ³)					6.373

Tablo 2.3. Deney numunelerine ait donatı metraji

Açıklama	Çapı	Adedi	Benzeri	Demir Boyu	φ6	φ8	φ10	φ12
					0.222	0.395	0.617	0.888
Temel	12.00	6.00	5.00	2.07				62.10
	12.00	15.00	5.00	0.72				54.00
	12.00	6.00	5.00	2.61				78.30
	12.00	14.00	5.00	1.26				88.20
	8.00	4.00	5.00	1.14		22.80		
1. Kat Döşeme	8.00	8.00	5.00	1.98		79.20		
	8.00	34.00	5.00	1.20		204.00		
2. Kat Döşeme	8.00	8.00	5.00	1.98		79.20		
	8.00	34.00	5.00	1.20		204.00		
1. Kat Kolon	10.00	8.00	5.00	2.10			84.00	
	10.00	8.00	5.00	1.24			49.60	
	8.00	11.00	5.00	0.88		48.40		
2.Kat Kolon	10.00	8.00	5.00	1.88			75.20	
	8.00	8.00	5.00	0.88		35.20		
1. Kat Kiriş	10.00	4.00	5.00	2.25			45.00	
	8.00	9.00	5.00	0.88		39.60		
	10.00	4.00	5.00	1.10			22.00	
	8.00	6.00	10.00	0.88		52.80		
	10.00	4.00	5.00	1.10			22.00	
2. Kat Kiriş	10.00	4.00	5.00	2.25			45.00	
	8.00	9.00	5.00	0.88		39.60		
	10.00	4.00	5.00	1.10			22.00	
	8.00	6.00	5.00	0.88		52.80		
	10.00	4.00	5.00	1.10			22.00	
Toplam (ton)						0.339	0.239	0.251

2.3.4. Deney Numunelerinin İmalatı

Deney numuneleri boyutlarının nispeten büyük olması ve laboratuvar koşullarının numune üretimine müsait olmaması nedeniyle üretim laboratuvar dışında gerçekleştirilmiştir. Üretim, temellerin imalatı, 1. kat ve 2. kat imalatları olarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada deney numunelerinin temel kalıpları oluşturulmuş ve detayları önceki bölümde sunulan temel donatıları kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Temel üzerinde 16 farklı noktada 50.00mm çapında PVC borular konularak, modelin sarsma masası üzerine sabitlenmesinde kullanılacak bağlantı elemanları için boşluklar bırakılmıştır. Öte yandan, ikinci aşamada oluşturulacak 1. kat kolonları için donatı filizleri projedeki yerlerine uygun bir biçimde temellere teşkil edilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında beton, hazır beton santralinden istenmiştir. Temel betonundan; beton dayanımının tayinin için 6 adet küp beton numunesi ve kullanılan betonun gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi amacıyla 6 adet 10.00×20.00cm silindir beton numunesi ve betonun yarmada çekme dayanımının tayini için 6 adet 15.00×30.00cm silindir beton numunesi alınmıştır. Temellerin üretimine ait görseller Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Temel kalıbı ve donatılarının hazırlanışı, beton dökümü

Temellerde beton dökümünün gerçekleştirilmesinden 7 gün sonra ikinci aşama olan 1. katın kalıplarının üretimine başlanmıştır. Deneyler sırasında kolonlarda ve kirişlerde oluşacak çatlakların belirginliğini artırmak ve pürüzsüz yüzeyler elde etmek amacıyla plywood malzeme kullanılmıştır. Kalıp işleminin ardından donatılar proje verilerine uygun olarak imal edilip ilgili elemanlara yerleştirilmiştir. Ölçekli deney numunelerinde kullanılan kesitlerin küçük olması ve bindirme bölgelerinde donatı yoğunluğunun artması nedeniyle betonunun yerleştirilmesinde karşılaşılabilecek sorunları bertaraf etmek amacıyla ikinci kat kolonları için 1. kat döşeme seviyesinde filizler bırakılmamış olup 1. ve 2. kat kolonlarının boyuna donatıları tek seferde üretilmiştir. Döşeme üzerinde 8 farklı noktada 50.00mm çapında PVC borular konularak, ilave yüklerin deney numunesi üzerine sabitlenmesinde kullanılacak bağlantı elemanları için boşlukların bırakılması amaçlanmıştır. Temellere benzer şekilde 1. kat betonundan da beton dayanımının tayinin için 6 adet küp beton numunesi ve kullanılan betonun gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi amacıyla 6 adet 10.00×20.00cm silindirik beton numunesi ve betonun yarmada çekme dayanımının tayini için 6 adet 15.00×30.00cm silindirik beton numunesi alınmıştır. Deney numunelerinin 1. katlarının imalatına ait görseller Şekil 2.10'da sunulmuştur.



Şekil 2.10. 1. kat kalıp ve donatı imalatı, beton dökümüne ait görseller

Şekil 2.10'nun devamı,



1. kat beton dökümünün gerçekleştirilmesinden 7 gün sonra üçüncü aşama olan 2. katın kalıplarının üretimine başlanmıştır. İlave kütleler için döşeme üzerinde 8 farklı noktada 50mm çapında PVC borular konularak boşluklar bırakılmıştır. Bu kattan da 6 adet küp beton numunesi 6 adet 15.00×30cm silindir beton numunesi ve 6 adet 10.00×20cm silindir beton numunesi alınmıştır. 2. katların imalatına ait görseller Şekil 2.11'de sunulmuştur.



Şekil 2.11. 2. kat kalıp ve donatı imalatı, beton dökümüne ait görseller

Şekil 2.11'in devamı,



Her bir beton dökümü sonrasında belirli aralıklarla beton sulanmış ve kür yapılmıştır. İmalatı tamamlanan ve kalıpları sökülün deney numuneleri 30 gün sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarına vinç ve kamyon yardımıyla taşınmıştır. Taşıma işlemine ait görseller Şekil 2.12'de sunulmuştur.



Şekil 2.12. Deney numunelerinin laboratuvara taşınması

2.3.5. Malzeme Özelliklerinin Tayini

Deney numunelerinin detaylandırılmasında kullanılan tam ölçekli bina modelinin tasarımı sırasında dikkate alınan beton sınıfı C12/15 ($f_{ck}=12\text{MPa}$) ve donatı sınıfı ise S420 ($f_{yk}=420\text{MPa}$)'dir. Tam ölçekli bina modelinden deney numunelerine detaylandırılması

sırasında yapay kütle benzeştirmesi modeli esaslarına uygun ölçeklendirme katsayıları kullanılmıştır. Bu modelde, beton ve çelik için gerilme ölçek faktörü 1.0 olarak dikkate alınmaktadır. Bu nedenle tüm deney numuneleri için malzeme açısından herhangi bir ölçeklendirme yapılmamıştır.

Deney numunelerinin üretimi sırasında beton hazır beton santrallerinden getirilmiştir. Deney numunelerinin imalatı temel, 1. ve 2. kat üretimi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Her bir aşamada beton dayanımının tayinin için 6 adet 15.00×15.00×15.00cm boyutlarında küp beton numunesi ve betonun gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi amacıyla 6 adet 10.00×20.00cm silindir beton numunesi ve betonun yarmada çekme dayanımının tayini için 6 adet 15.00×30.00cm silindir beton numunesi alınmıştır. Böylece toplamda 18 adet küp beton numunesi, 36 adet silindir beton numunesi alınmıştır. Alınan bu numunelerin 1/3'ü kür havuzu dışında deney numuneleri ile aynı ortam koşullarında bekletilmiştir. Kalan deney numuneleri ise 28 gün boyunca $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir (Özbayrak, 2017; Türkay, 2019). Bu süreç sonrasında beton numuneler basınç ve yarma deneylerine tabii tutulmuştur.

Deney numunelerinin temellerinde 12.00mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerde boyuna donatı olarak 10.00mm çapında, enine donatı olarak 8.00mm çapında donatılar kullanılmıştır. Döşemede kullanılan donatı çapı ise 8.00mm'dir. İmalatta kullanılan donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilebilmesi için her çaptan üçer adet donatı numunesi alınmıştır ve çekme deneyine tabii tutulmuştur.

2.3.5.1. Beton Basınç Deneyleri

Deney numunelerinin temel, 1. ve 2. kat imalatları sırasında TS EN 12350-1'de verilen esaslara uygun şekilde toplamda 18 adet küp ve 36 adet silindir beton numunesi alınmıştır (TS EN 12350-1, 2019). TS EN 12390-1'de deney numunesi ve kalıp özelliklerine ait verilen nominal boyutlar dikkate alınarak küp numunelerin kenar uzunlukları 15.00cm olarak seçilmiştir. Silindir numunelerin çap/yükseklik oranı 0.50 olacak şekilde boyutları 10.00×20.00cm ve 15.00×30.00cm olarak boyutları seçilmiştir (TS EN 12390-1, 2021). Alınan deney numunelerinin 2/3'ü (12 adet küp numune, 24 adet silindir numune) TS EN 12390-2 esaslarına uygun olarak kür havuzunda bekletilmiştir (TS EN 12390-2, 2019). Geri kalan numuneler ise deney numunelerinin bulunduğu ortam koşullarında bekletilmiştir.

Betonarme deney numunelerinin imalatı sırasında alınan deney numunelerine ve kür havuzunda bekletilen numunelere ait görseller Şekil 2.13'te verilmiştir.



a. Temelden alınan numuneler



b. 1. kattan alınan numuneler



c. 2. kattan alınan numuneler

Şekil 2.13. Betondan alınan küp ve silindir numuneler

18 adet küp deney numunesinin beton basınç dayanım testleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı ve Malzeme laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen kırılma yükleri ve beton dayanım değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir. Ayrıca Tablo 2.4'te küp numuneler için elde edilen dayanım değerleri 0.85 katsayısı ile çarpılarak silindir numune basınç dayanımına dönüştürülmüştür. Küp deney numuneleri ile gerçekleştirilen basınç dayanım testlerine ait görseller Şekil 2.14'te verilmiştir. Tablo 2.4'ten görüleceği üzere betonarme deney numuneleri ile aynı ortam ve kür koşullarında tutulan beton numunelerinin dayanımları kür havuzunda bekletilenlere oranla oldukça düşüktür.



Şekil 2.14. Küp deney numunelerinin beton basınç dayanım testleri

Tablo 2.4. Küp deney numunelerinin beton basınç dayanım değerleri

	Numune No	Konum	Yük (kN)	Basınç Dayanımı (MPa)	
				Küp Numune	Silindir Num. Karşılığı
Temel	1	Dışarı	279.74	12.43	10.57
	2		304.08	13.51	11.48
	3		492.65	21.90	18.62
	4	Kür	472.66	21.01	17.86
	5		469.91	20.88	17.75
	6		438.44	19.49	16.57
1. Kat	1	Dışarı	278.36	12.37	10.51
	2		270.55	12.02	10.22
	3		528.47	23.49	19.97
	4	Kür	516.30	22.95	19.51
	5		502.75	22.34	18.99
	6		492.19	21.88	18.60
2. Kat	1	Dışarı	387.45	17.22	14.64
	2		375.74	16.70	14.20
	3		537.89	23.91	20.32
	4	Kür	545.93	24.26	20.62
	5		538.81	23.95	20.36
	6		518.14	23.03	19.58

10.00×20.00cm boyutlarındaki silindir numunelerin basınç dayanım testleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde kür havuzunda ve dış ortam koşullarında bekletilen 18 adet silindir numune kullanılmıştır.

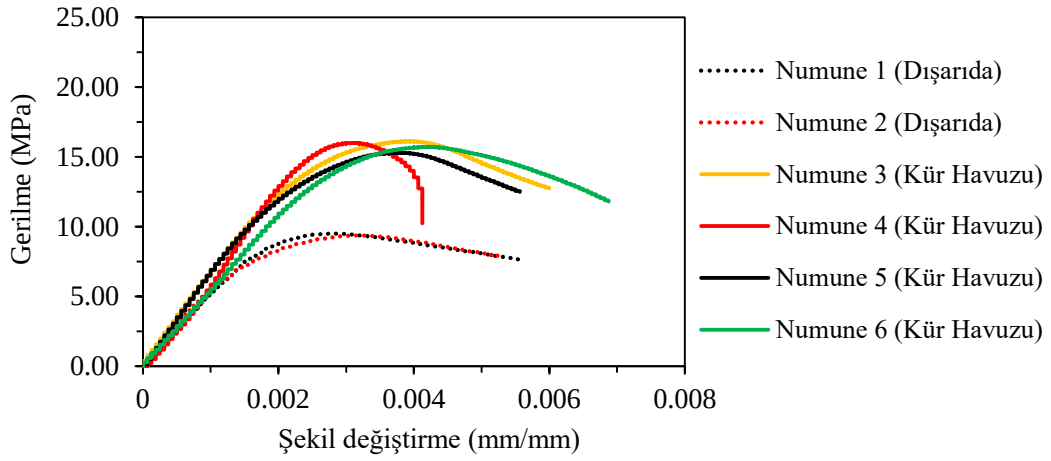
Basınç deneylerinden önce TS EN 12390-3 esaslarına göre kükürt başlıklama yapılmıştır (TS EN 12390-3, 2019). Silindir numuneler ile gerçekleştirilen basınç testleri sırasında, betondaki birim boy kısalmasını, gerilme-şekil değiştirme eğrisini ve elastisite modülünü tespit etmek amacıyla üzerinde 3 adet lineer potansiyometrik deplasman sensörü bulunan kompressometre kullanılmıştır (Şekil 2.15). Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 2.5’te verilmiştir. Silindir numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri ise Şekil 2.16-Şekil 2.18’de verilmiştir.



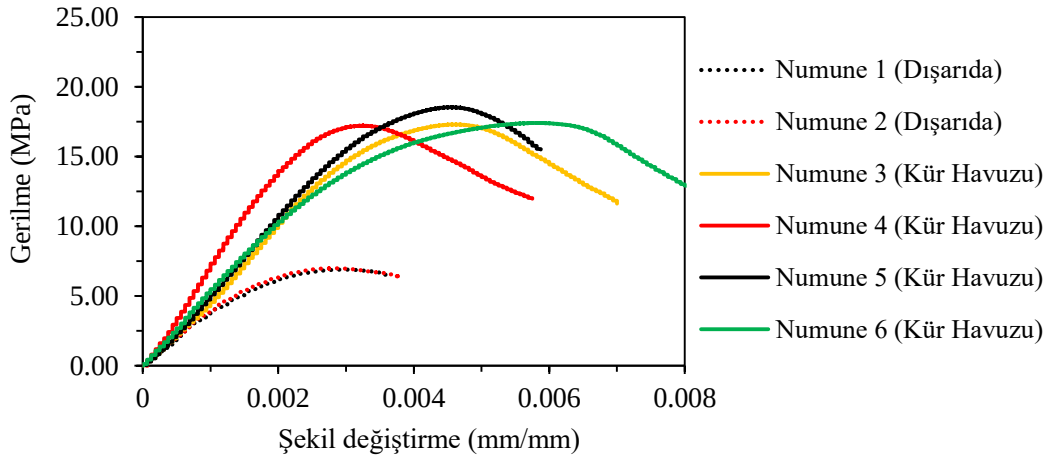
Şekil 2.15. Silindir deney numunelerinin beton basınç dayanım testleri

Tablo 2.5. Silindir deney numunelerinin beton basınç dayanım değerleri

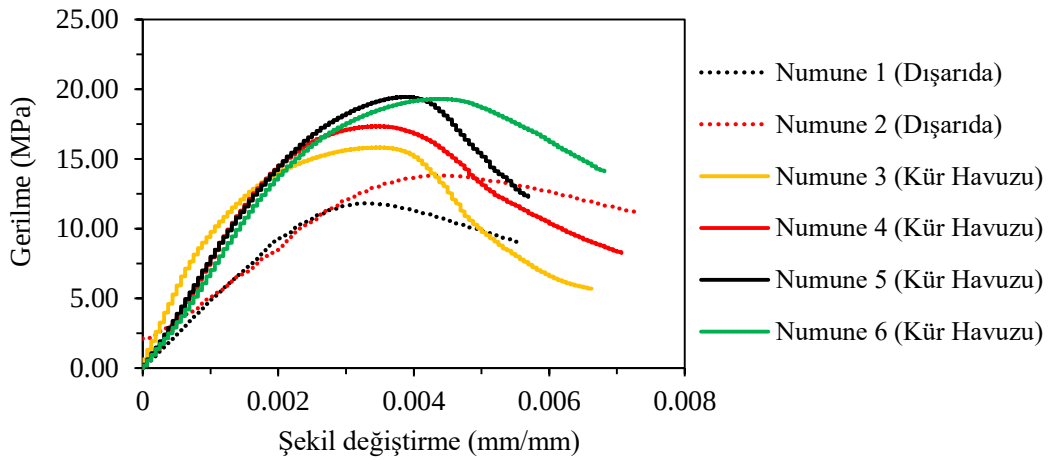
	Numune No	Konum	Basınç Dayanımı (MPa)
Temel	1	Dışarı	9.51
	2		9.37
	3	Kür Havuzu	16.11
	4		15.99
	5		15.29
	6		15.71
1. Kat	1	Dışarı	6.88
	2		6.98
	3	Kür Havuzu	17.29
	4		17.20
	5		18.52
	6		17.39
2. Kat	1	Dışarı	11.81
	2		11.70
	3	Kür Havuzu	15.80
	4		17.33
	5		19.43
	6		19.29



Şekil 2.16. Temel betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 2.17. 1. kat betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 2.18. 2. kat betonuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

2.3.5.2. Beton Yarmada Çekme Dayanım Deneyleri

Betonun çekme dayanımı, 15.00×30.00cm boyutlarındaki silindir beton numunelerin TS EN 12390-6 esaslarına göre gerçekleştirilen yarmada çekme dayanım deneyleri ile tespit edilmiştir (TS EN 12390-6, 2010). Bu deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Toplamda 18 silindir deney numunesi ile gerçekleştirilen deneylerde 6 numune betonarme deney numuneleri ile aynı ortam koşullarında saklanmıştır. Diğer 12 silindir numune ise TS EN 12390-2 esaslarına uygun olarak kür havuzunda bekletilmiştir. Yarmada çekme dayanım deneylerine ait görseller Şekil 2.19’da elde edilen kırılma yükleri ve dayanımlar Tablo 2.6’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 2.6’da sunulan karakteristik eksenel çekme dayanım değerleri TS 500 esaslarına uygun olarak yarmada çekme deneylerinden elde edilen çekme dayanımının 1.50 ile bölünmesi ile elde edilmiştir (TS 500, 2000).

Tablo 2.6. Beton yarmada çekme dayanım ve karakteristik eksenel çekme dayanım değerleri

	Numune No	Konum	Yük (kN)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı (MPa)
Temel	1	Dışarı	110.38	1.56	1.04
	2		118.30	1.67	1.12
	3	Kür Havuzu	180.52	2.56	1.70
	4		171.56	2.43	1.62
	5		172.02	2.43	1.62
	6		190.16	2.69	1.79
1. Kat	1	Dışarı	87.00	1.23	0.82
	2		81.55	1.15	0.77
	3	Kür Havuzu	177.07	2.51	1.67
	4		160.77	2.28	1.52
	5		199.58	2.82	1.88
	6		142.85	2.02	1.35
2. Kat	1	Dışarı	131.6	1.86	1.24
	2		109.78	1.55	1.04
	3	Kür Havuzu	201.65	2.85	1.90
	4		161.46	2.29	1.52
	5		190.39	2.69	1.80
	6		162.37	2.30	1.53



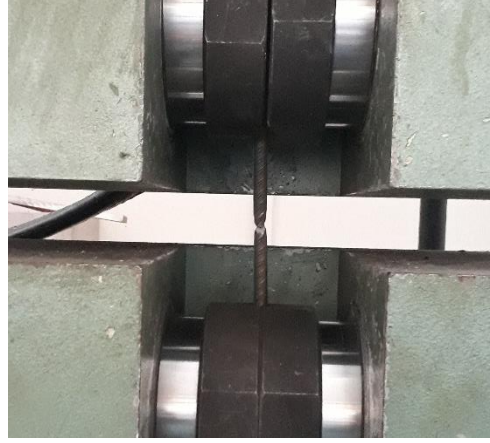
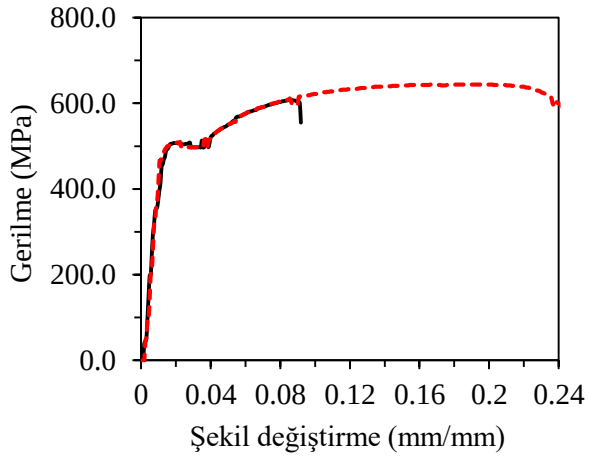
Şekil 2.19. Beton yarmada çekme dayanım testi

2.3.5.3. Donatı Çekme Deneyleri

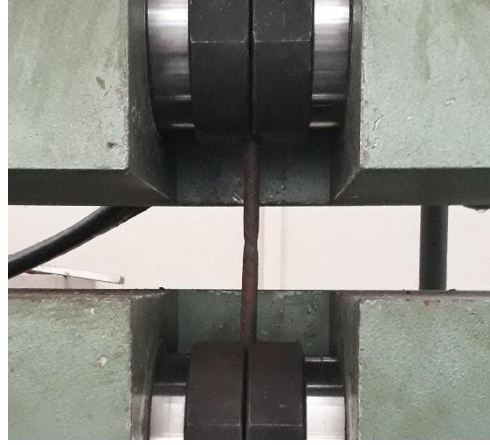
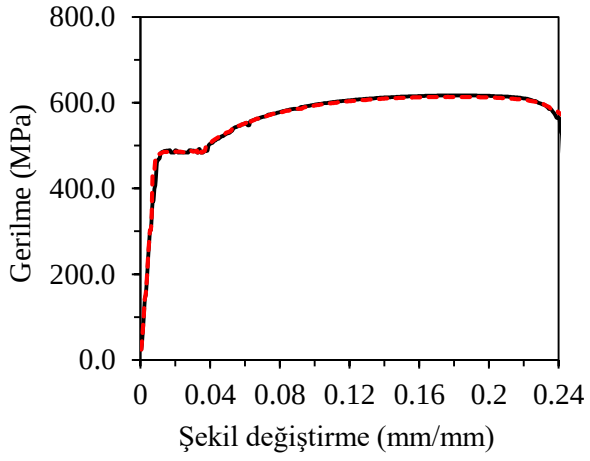
Betonarme deney numunelerinin üretiminde kullanılan $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$ donatıların her birinden üçer adet alınan örnekler ile donatıların çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donatı çekme deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri ve deney sonrası görselleri Şekil 2.20-2.22’de verilmiştir. Donatılara ait diğer mekanik özellikler ise Tablo 2.7’de sunulmuştur. Tablo 2.7’de R_e , R_m , ve ϵ_{su} sırasıyla donatının akma dayanımını, çekme dayanımını ve kopma uzamasını ifade etmektedir. $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$ donatıların ortalama akma dayanımları sırasıyla 480MPa, 477MPa ve 463MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.7. $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$ donatılara ait mekanik özellikler

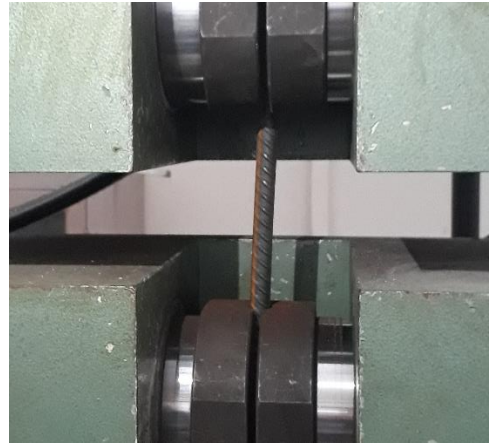
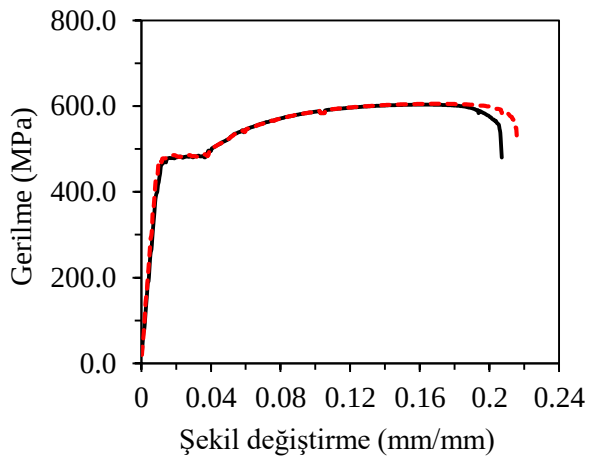
Numune	Alan (mm ²)	R_e (MPa)	R_m (MPa)	R_m/R_e	ϵ_{su} (%)
8mm	50.26	486	607	1.24	8.56
		474	643	1.35	20.18
		-	-	-	-
10mm	78.54	-	-	-	-
		474	614	1.29	17.65
		481	617	1.28	20.05
12mm	113.09	472	606	1.28	17.58
		463	604	1.30	17.25
		455	598	1.31	17.14



Şekil 2.20. $\phi 8$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 2.21. $\phi 10$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 2.22. $\phi 12$ donatılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

2.4. Deney Düzeneginin Tasarımı ve Üretimi

2.4.1. İlave Kat Kütleleri

Sarsma masası ile gerçekleştirilen testlerde katlara ilave edilecek kütlelerin belirlenmesi için bir yapay kütle simülasyon yaklaşımı kullanılmıştır (Quintana-Gallo vd., 2010). Bu yaklaşımda deney numunesi ile ölçeklendirilmemiş bina arasındaki kütle oranı Denklem (2.1) ile verilen koşulu sağlamalıdır.

$$M_r = \frac{M_M}{M_P} = L_r^2 \quad , \quad L_r^2 = \frac{1}{S_L^2} \quad (2.1)$$

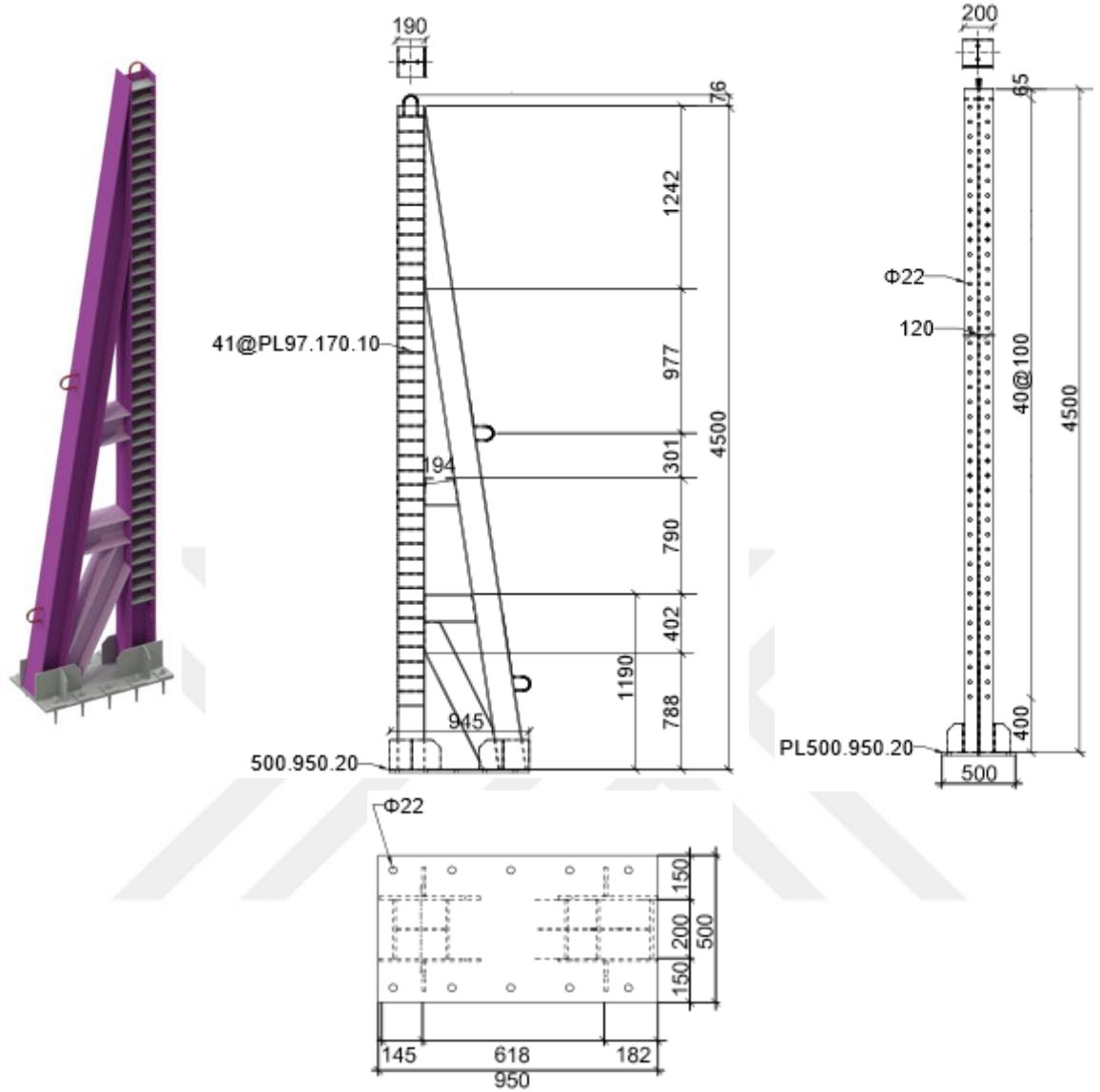
Burada M_r , kütle oranı, M_M deney numunesinin ağırlığı, M_P ölçeklendirilmemiş bina ağırlığı, S_L ölçek faktörüdür. Denklem (2.1) ile verilen koşulun sağlanması için yapıya eklenecek ilave kütle Denklem (2.2) ile hesaplanır.

$$M_{m1} = \frac{M_P}{S_L^2} - M_{m0} \quad (2.2)$$

Burada M_{m1} deney numunesine ilave edilecek kat kütlesini, M_{m0} deney numunesinin kütlesini ifade etmektedir. Yapılan hesaplar sonucunda her bir kata eklenecek ilave kütle yaklaşık 1.70ton olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu ağırlıklar 25.00×100.00×1.60cm boyutlarında çelik levhalar ile üretilmiş olup deney numunesi üzerine 8 adet M14 tij ile bağlantısı sağlanmıştır (Şekil 2.30).

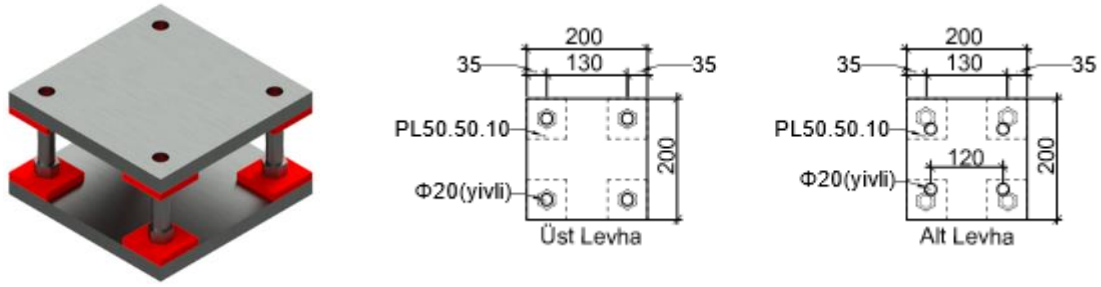
2.4.2. Düzlem Dışı Hareketi Engelleyen Çelik Çerçeveler ve Çarpışma Duvarı

Çarpışma duvarına ait detaylar ve üç boyutlu görünümü Şekil 2.23'te verilmiştir. Sarsma masası deneylerinde, esnek bina betonarme düzlem çerçeveler ile temsil edilirken ağır (rijit) binayı temsil etmek amacıyla çelik profillerle imal edilen bir çarpışma duvarı kullanılmıştır. Çarpışma duvar 15.00mm kalınlığında S235JR kalite çelik levhalarda üretilmiştir. Bu çarpışma duvarının yüksekliği 4.50m olup ön yüzeyinde 10.00cm aralıkla 22.00mm çapında çift sıra delikler bulunmaktadır.



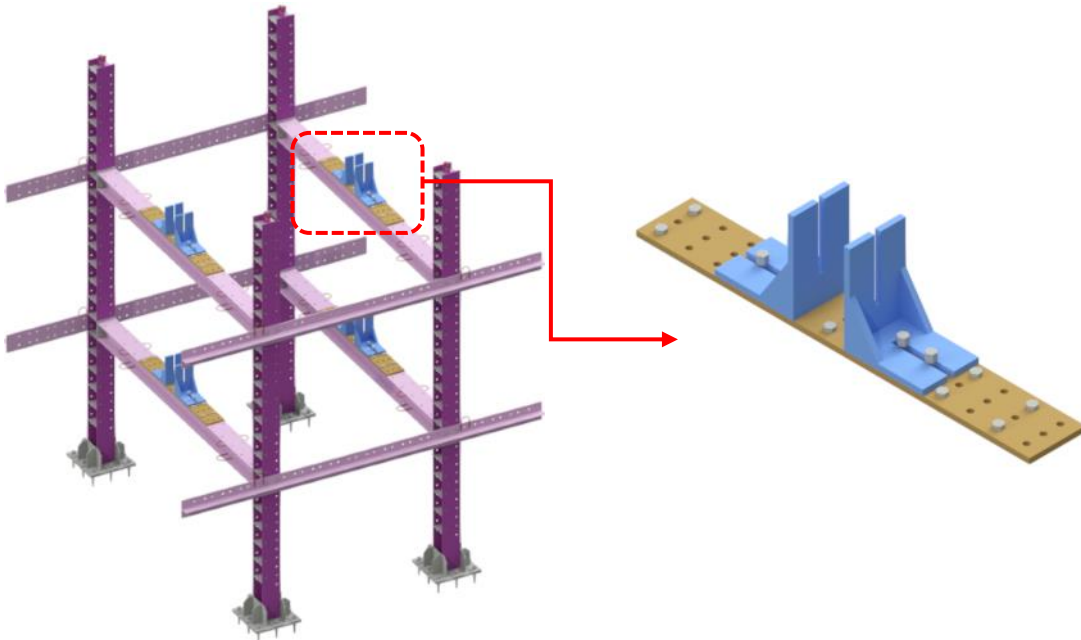
Şekil 2.23. Çarpışma duvarına ait detaylar ve üç boyutlu görünüm

Betonarme binalar ile çarpışma duvarı arasındaki çarpışma yüzeyini oluşturabilmek ve derz miktarının hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için bir çarpışma elemanı tasarlanmıştır. Bu eleman çarpışma duvarı üzerindeki delikler ve kullanılan yivler ile istenilen konumda ve derz mesafesinde çarpışma testlerinin yapılmasına olanak vermektedir. Bu eleman, 4 adet 20.00mm çapında ve 300.00mm uzunluğunda gijon tijden, üzerinde 4 adet 20.00mm yivli delik bulunan 200.00×200.00×20.00mm ebatlarında S235JR kalite iki adet çelik levhadan ve 50.00×50.00×10.00mm ebatlarında S235JR kalite 4 adet çelik levhadan oluşmaktadır. Çarpışma elemanına ait üç boyutlu görünümü Şekil 2.24'te verilmiştir.

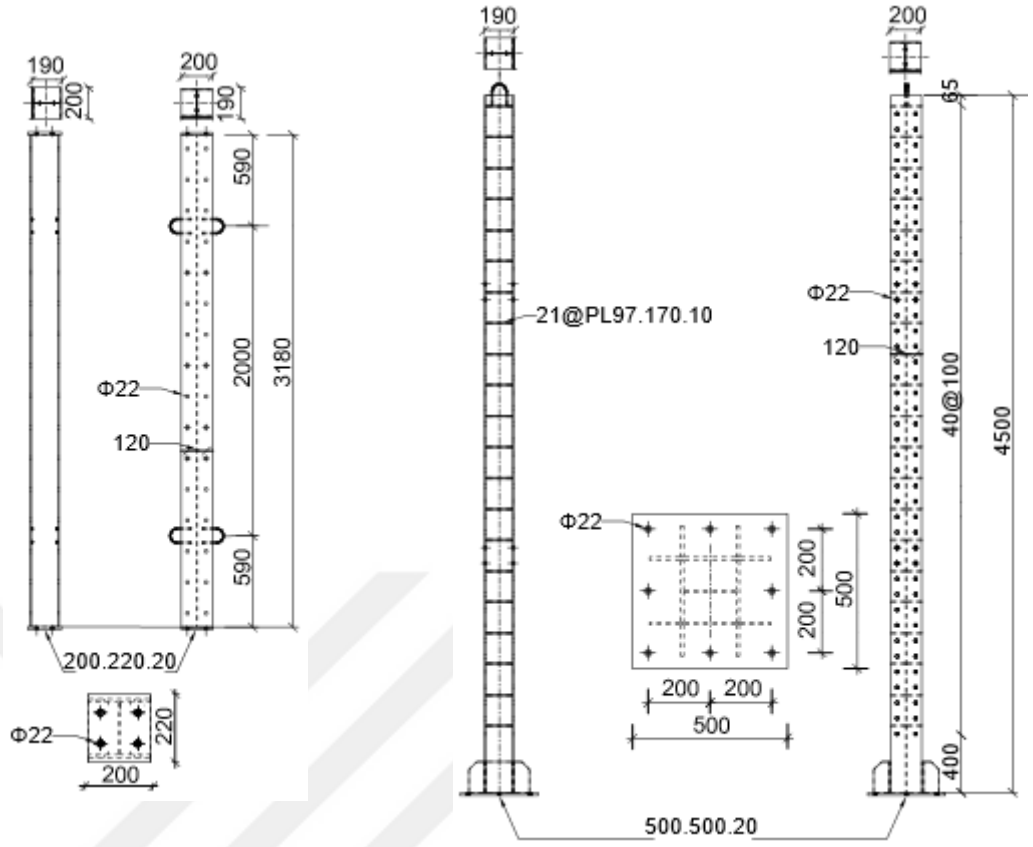


Şekil 2.24. Çarpışma elemanına ait boyutlar ve üç boyutlu görünüm

Deneyler sırasında, düzlem dışı hareketin önlenmesi ve olası göçme durumlarına karşı güvenlik almak amacıyla bir çelik çerçeve imal edilmiştir. Kolon ve rulmanların bağlandığı kirişler I kesite sahip olup, kolonları birbirine bağlayan kirişler T kesitlidir. Kolonlar ve kirişler üzerine açılan 20.00mm çapında delikler farklı deney numunelerinde de bu çerçevenin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Deneyler sırasında, betonarme düzlem çerçevelerin düzlem dışı hareketinin önlenmesi için imal edilen çelik çerçeve üzerine S235JR kalite çelik plakalar ve rulmanlar ile ayarlanabilir bir sistem teşkil edilmiştir. Bu amaçla 8 adet rulman kullanılmıştır. Oluşturulan çelik çerçeveye ve rulman sistemine ait detaylar ve görseller Şekil 2.25 ve Şekil 2.26’da sunulmuştur.

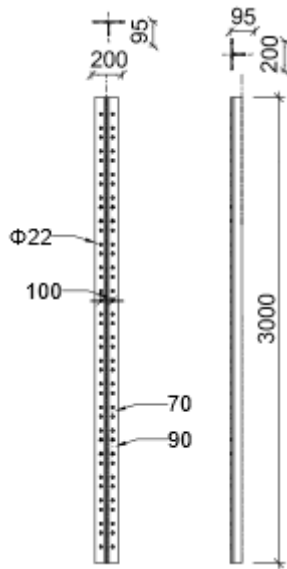


Şekil 2.25. Çelik çerçeve ve rulman sistemine ait üç boyutlu görünüm

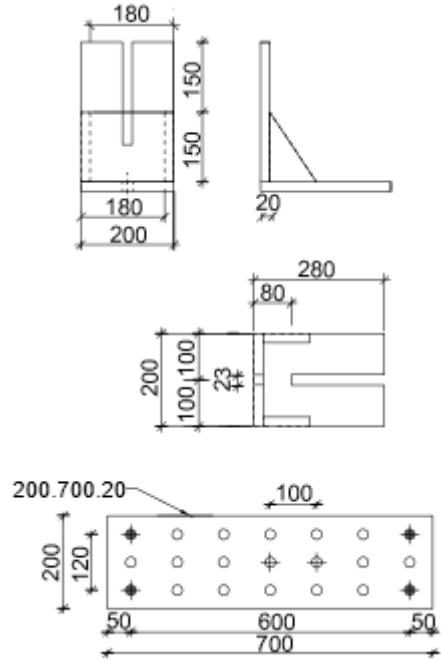


a. I kesitli kirişler

b. Kolonlar



c. T kesitli kirişler

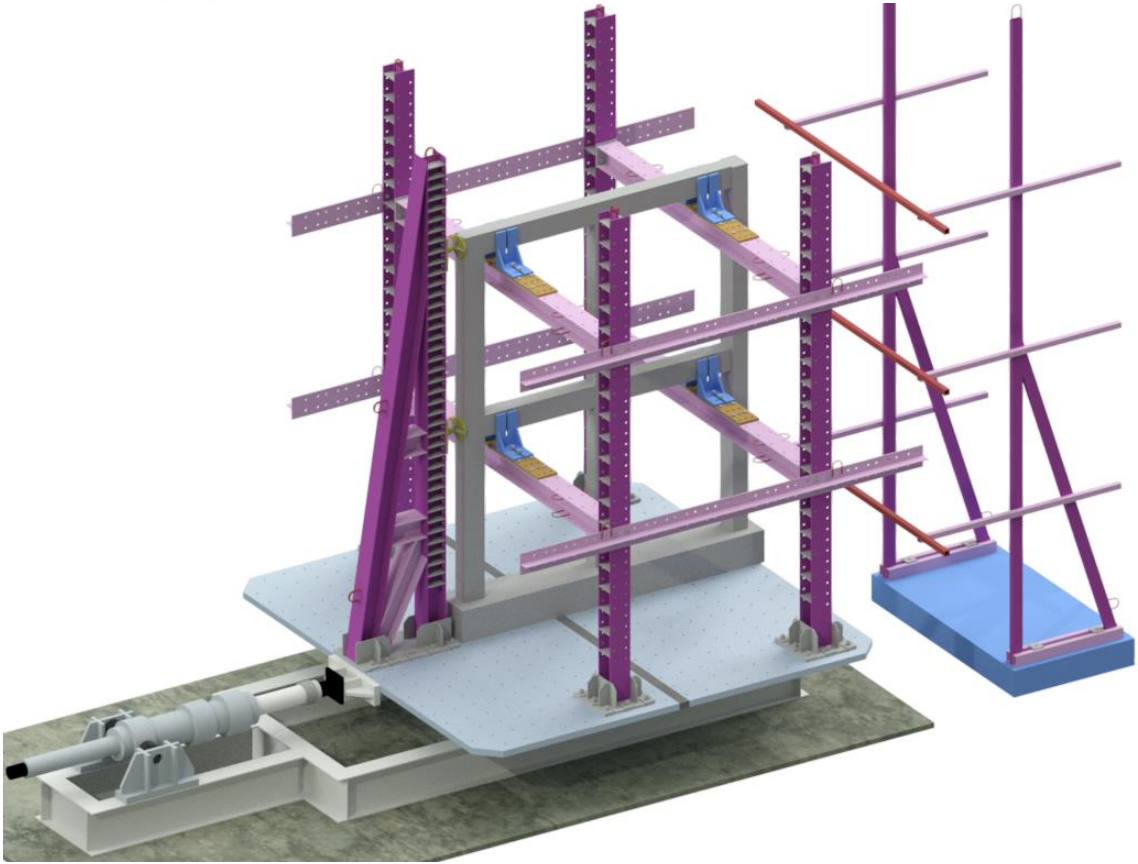


d. Rulman sistemi

Şekil 2.26. Çelik çerçeve ve rulman sistemine ait detaylar

Sarsma masası deneyleri sırasında betonarme deney numunesinin hareket yönündeki yer değiştirmelerini izlemek amacıyla kullanılacak lineer potansiyometrik cetvellerin (LPDT) sarsma masası dışına bağlanması amacıyla kutu profillerden bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzende profiller birbirlerine sabitlenmemiş olup levhalar vasıtasıyla istenilen konuma yerleştirilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek deneyler için hazırlanan deney düzeneğine ait üç boyutlu gösterim Şekil 2.27’de sunulmuştur.

Yukarıda detayları ve şematik gösterimleri verilen deney düzeneğinin üretim sonrası gerçekleştirilen kurulumuna ait fotoğraflar Şekil 2.28-2.31’de verilmiştir.



Şekil 2.27. Deney düzeneğine ait şematik gösterim



Şekil 2.28. Kurulumu tamamlanan deney düzeneği

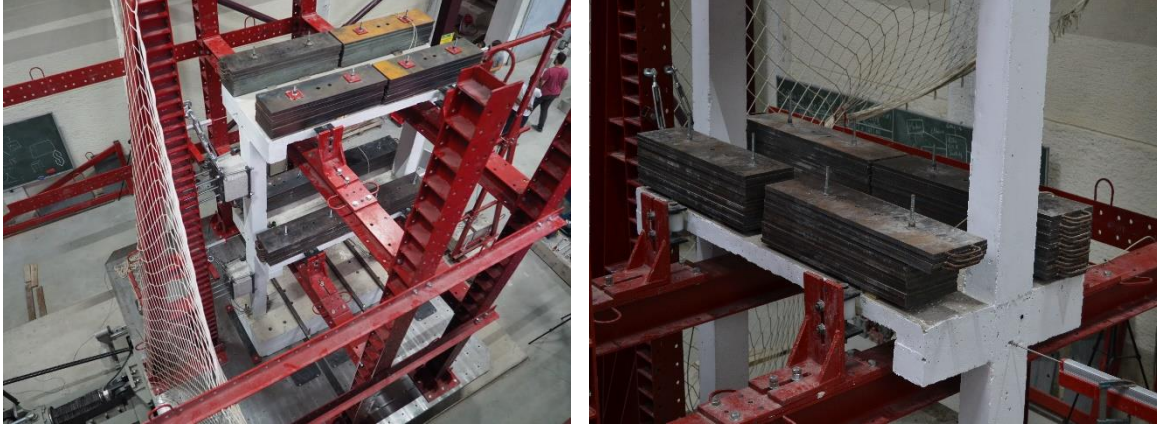


a. Pilot deneyler

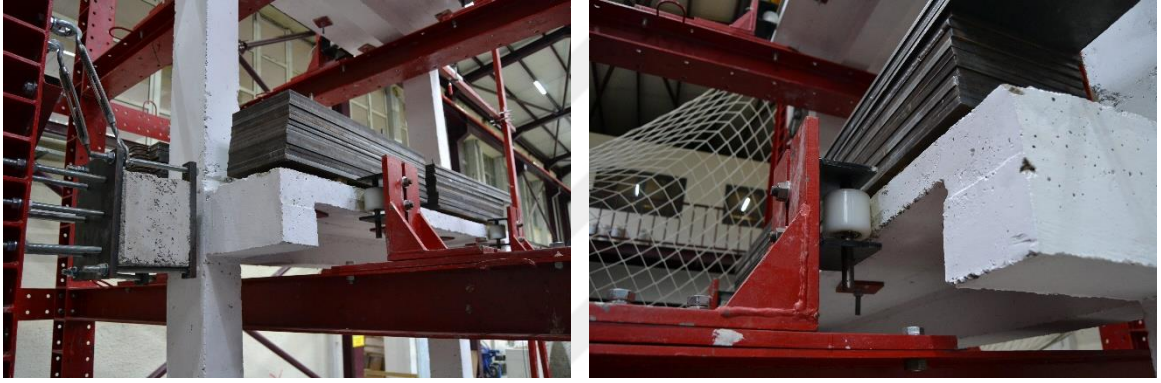


b. Esas deneyler

Şekil 2.29. Çarpışma duvarı ve kullanılan çarpışma elemanları



Şekil 2.30. Kat seviyesine teşkil edilen ilave kütleler



Şekil 2.31. Kat seviyelerine yerleştirilen rulmanlar

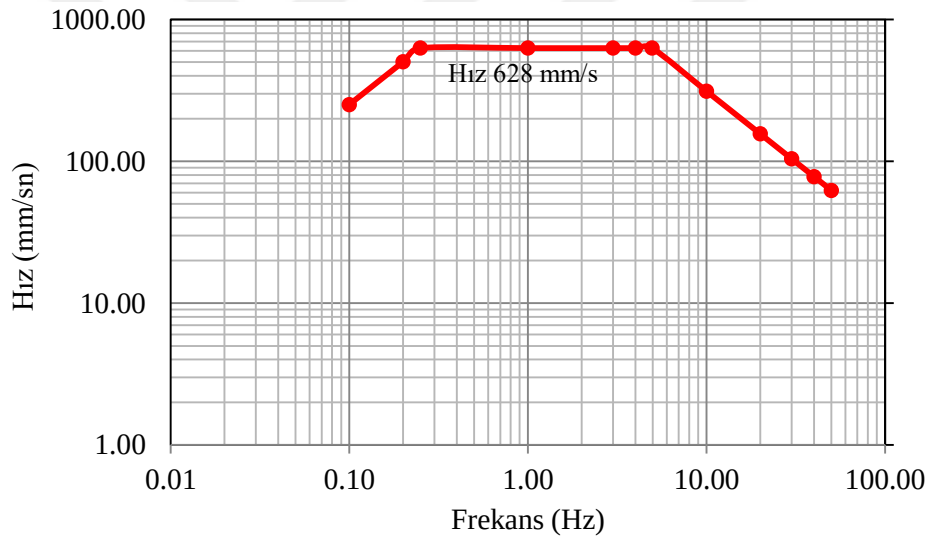
2.5. Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Aletleri

Deneyler sırasında yapısal tepkilerin elde edilmesi amacıyla çeşitli kapasitelerde ivmeölçerler ve LPDT kullanılmıştır. Öte yandan numunelerin hasarsız ve her bir sarsma masası deneyi sonrası hasarlı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla ortam titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde ise tek eksenli hassas ivmeölçerler kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar, konumları ve doğrultuları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.5.1. Sarsma Masası

Tez kapsamında betonarme binalar arasındaki çarpışma davranışını ve çarpışmanın yapısal elemanlardaki hasar seviyelerine olan etkilerinin incelenmesi amacıyla üretilen

betonarme deney numuneleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı'nda bulunan sarsma masası üzerinde deneye tabi tutulmuştur. 4.00×4.00m boyutlarındaki bu sarsma masasının maksimum çıkabildiği ivme $\pm 2.00g$ 'dir. $\pm 400.00mm$ yer değiştirme yapabilme ve 0.10-50.00Hz frekans aralığında çalışma kabiliyetine sahiptir. 628.00mm/sn hızla çıkabilme kabiliyeti, geçmiş depremlerden elde edilen birçok yer hareketinin deneylerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sarsma masasının hız-frekans grafiği ve Şekil 2.32'de verilmiştir. Ayrıca, tek doğrultuda hareket edebilen sarsma masası 500.00kN dinamik yatay kuvvet ve 350.00kN düşey yük kapasitesine sahiptir. Tabla üzerindeki 20.00cm arayla 20.00mm çapındaki yivli delikler vasıtasıyla deney numuneleri ile masanın bağlantısı gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.33).



Şekil 2.32. Tek eksenli 500kN yatay kuvvet ile sarsma masası kapasite grafiği



Şekil 2.33. Sarsma masası

2.5.2. İvmeölçerler

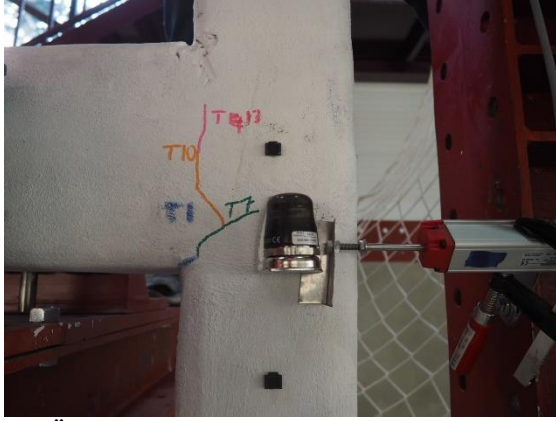
Sarsma masası deneyleri sırasında sarsma masasında, kat seviyelerinde, çarpışma bölgelerinde ve çarpışma duvarında oluşan ivmelerin elde edilmesi amacıyla toplamda 4 adet $\pm 2.00g$ kapasiteli tek eksenli kablolu ivmeölçer (SENSEBOX7001) ve $\pm 40.00g$ kapasiteli 3 adet kablosuz üç eksenli ivmeölçer (GLINK200-40g) kullanılmıştır. Tek eksenli ivmeölçerlerden ilki deneylerde uygulanan ve masadan ölçülen yer hareketi arasındaki uyumu takip etmek amacıyla sarsma masası üzerine yerleştirilmiştir. İki adet tek eksenli ivmeölçer kat seviyelerinde oluşan hareket yönündeki (düzlem içi) ivmeleri elde etmek amacıyla teşkil edilmiştir. Deneyler sırasında oluşan düzlem dışı tepkileri takip etmek amacıyla numunelerin 2. katına bir adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bu ivmeölçerlerden gelen sinyal verilerinin toplanması için 8 kanallı veri toplama sistemi (TESTBOX2010) kullanılmıştır (Şekil 2.34).



a. Tek eksenli ivmeölçerler (SENSEBOX7001) b. Veri toplama sistemi (TESTBOX2010)

Şekil 2.34. Tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama sistemi

Komşu binaların çarpışması oluşan pikler oldukça kısa süreli olması nedeniyle deneyler sırasında oluşan değişimlerin yakalanması oldukça önemlidir. Bu nedenle 4.00kHz'e kadar ayarlanabilir örnekleme hızına sahip ve $\pm 40.00g$ ölçüm kapasiteli 3 eksenli kablosuz ivmeölçerler kullanılmıştır. Çarpışma duvarının ve numunelerin çarpışma bölgelerine yakın yerlerde toplamda 3 adet bu ivmeölçerden kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlerden gelen sinyal verilerinin toplanması için bir veri toplama sistemi (WSDA-BASE-101) kullanılmıştır. Kullanılan üç eksenli ivmeölçerlere ait görseller Şekil 2.35 ve deneylerde dikkate alınan ivmeölçerler düzeni Şekil 2.36 ile verilmiştir.

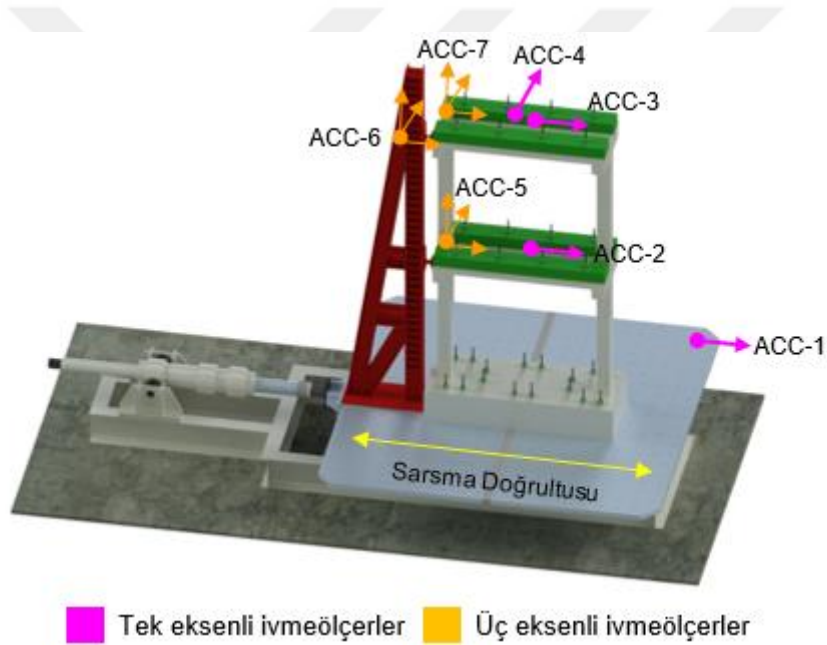


a. Üç eksenli ivmeölçerler (GLINK200-40g)



b. Veri toplama sistemi (WSDA-BASE-101)

Şekil 2.35. Üç eksenli ivmeölçer ve veri toplama sistemi



Şekil 2.36. İvmeölçerlere ait konum ve doğrultular

2.5.3. Lineer Potansiyometrik Cetvel (LPDT)

Deneylerde 400.00mm (± 200.00 mm) strok uzunluğuna sahip 3 adet LPDT (RTL400), deney numunelerinin temelini ve katlarının hareket doğrultusundaki yer değiştirmelerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca betonarme numune ile rijit çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değiştirmeleri elde etmek amacıyla aynı strok uzunluğuna sahip 2 adet LPDT teşkil edilmiştir. Temel-kolon yüzeyindeki açılmaları ölçmek amacıyla her bir kolonun her iki yüzüne karşılıklı olarak 100.00mm (± 50.00 mm) strok uzunluğuna sahip

2'şer adet LPDT (SLPS100) yerleştirilmiştir. Bu cetveller için kolona yerleştirilen rotlar, temel yüzeyinden 7.50cm (hareket yönüne dik kesit yüksekliğinin yarısı (0.5h)) yükseklikte bulunmakta olup bu rotlara takılan LPDT eksenleri kolon yüzüne 50.00mm mesafede olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca kolon alt uçlarında eğrilik ölçümü yapmak amacıyla her bir kolonun her iki yüzüne karşılıklı olarak 2'şer adet LPDT (SLPS100) yerleştirilmiştir. Bu cetveller temel yüzeyinden 15.00cm (h) yükseklikte ve kolon yüzüne 65.00mm mesafede bulunmaktadır. Bu LPDT'lerden gelen sinyal verilerinin toplanması için 8 kanallı iki adet veri toplama sistemi (TESTBOX2010) kullanılmıştır (Şekil 2.34). Kullanılan LPDT'lere ait görseller Şekil 2.37 ve deneylerde dikkate alınan LPDT düzeni Şekil 2.38 ile verilmiştir.



a. Temel ve kat seviyesi

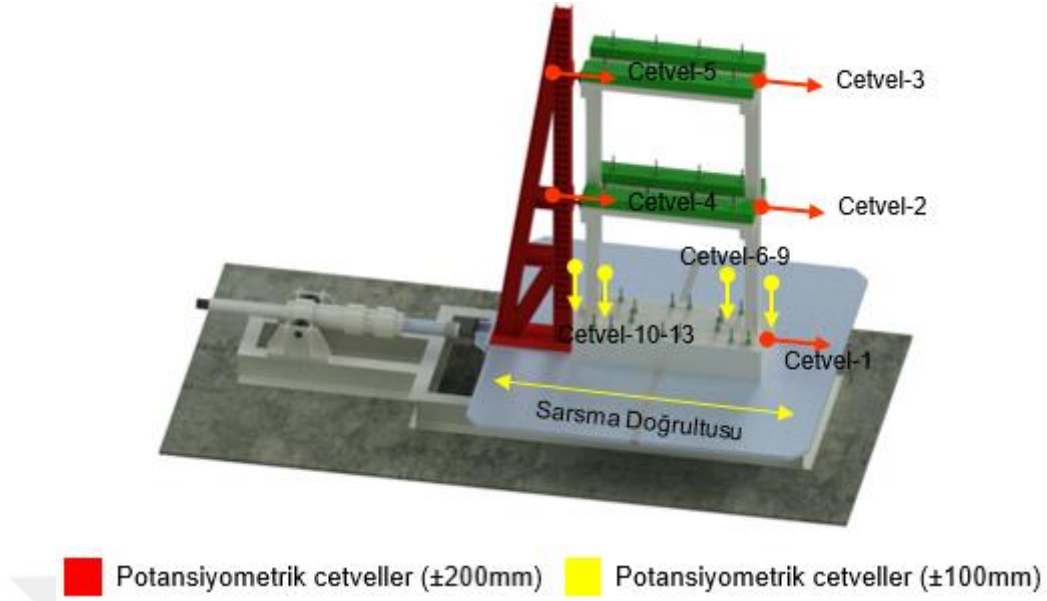


b. Kolon alt ucu



c. Numune-çarpışma duvarı arası

Şekil 2.37. Deneylerde kullanılan LPDT'ler



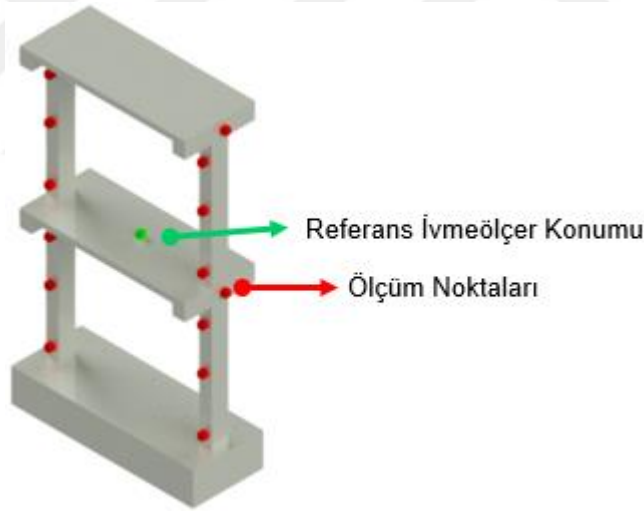
Şekil 2.38. LPDT konum ve doğrultuları

2.5.4. Çevresel Titreşim Testlerinde Kullanılan Cihazlar

Bu tez çalışması kapsamında, yapılan her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında, Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY) ile frekans, mod şekli ve sönüm oranı deneysel olarak belirlenmiştir. Sarsma masası deneylerinin ilk aşamasında üretilen referans betonarme deney numunesinin başlangıç (hasarsız) dinamik karakteristikleri ÇTY ile belirlenmiştir. Daha sonra sarsma masası üzerinde referans numune, çarpışma davranışı dikkate alınmadan dinamik yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrası ÇTY ile numunelerin dinamik karakteristikleri belirlenerek hasar tespiti yapılmış ve çarpışma olmaması durumunda betonarme numunelerde oluşan hasarların seviyeleri elde edilmiştir. Deneylerin devamında farklı çarpışma türleri altında komşu binalar arasındaki etkileşim dikkate alınarak sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çarpışma davranışının dikkate alındığı sarsma masası deneyleri sonucunda numunelerin ÇTY ile dinamik karakteristikler belirlenerek hasar tespiti yapılmış ve çarpışma durumunda betonarme numunelerde oluşan hasarların seviyeleri elde edilmiştir. Bu şekilde yapısal elemanlarda oluşan hasarların çarpışmadan ne ölçüde etkilendiği ve çarpışmanın yapı performansına olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

Çevresel titreşim testleri sırasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri seçilen yapının tipine ve frekans aralığına bağlı olarak belirlenen ivmeölçer tipidir. Tez

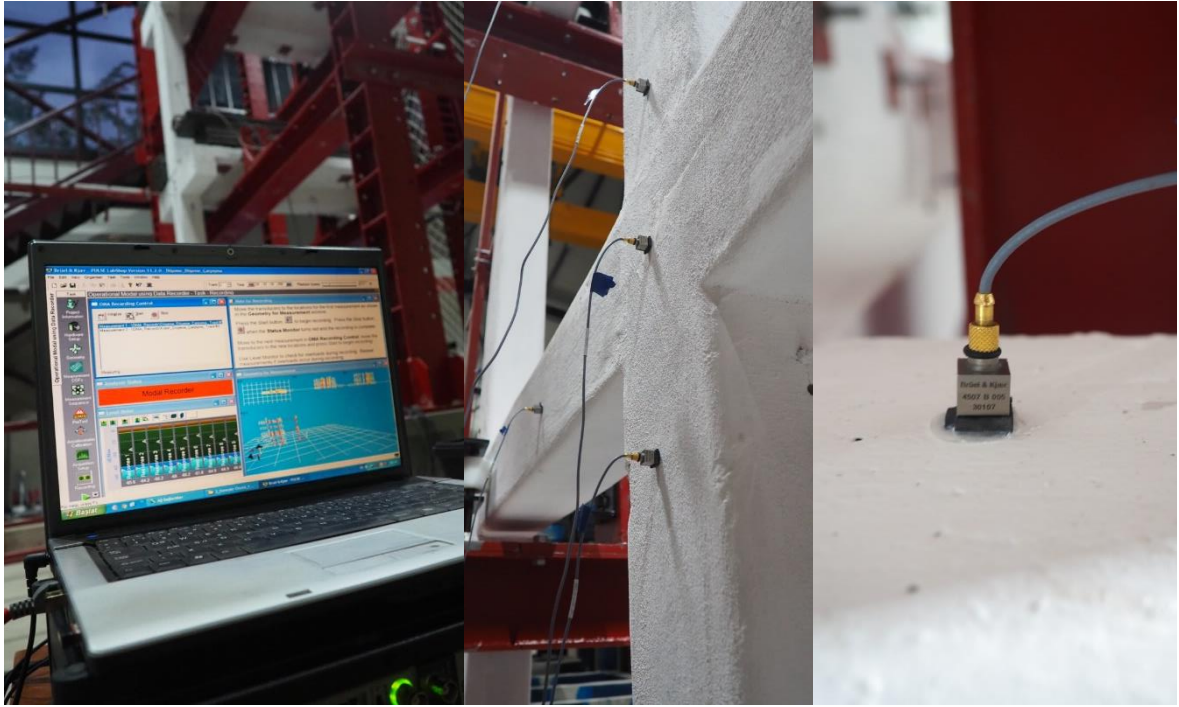
kapsamında, B&K 4507 B 005 (1V/g hassasiyet, 0.4-6000Hz frekans aralığı, $\pm 7g$ maksimum ivme) tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 1.16). Öte yandan kullanılan ivmeölçerin ağırlığının yapı ağırlığına kıyasla ihmal edilebilir düzeyde olması gerekmektedir. Kullanılan ivmeölçerler 4.80gr'dır ve numune ağırlığına kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir. İvmeölçerler, her bir kolonun potansiyel plastik mafsallara (0.5h), ortasına ve kolon-kiriş birleşim bölgelerine yerleştirilmiştir. Ayrıca çarpışmanın meydana geldiği kat seviyelerine de ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Böylece toplamda 16 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Sarsma masası deneyleri öncesi belirlenen ölçüm noktalarının sarsma masası deneyleri sonrası göçmesi durumunda dahi çevresel titreşim testlerinin gerçekleştirilebilmesi için numunelerin birçok noktasından ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler, ekipman yetersizlikleri nedeniyle (ivmeölçer sayısı, veri toplama sistemi kanal sayısı vb.) referans ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çevresel titreşim testleri için ivmeölçer yerleşim planı Şekil 2.39'da verilmiştir.



Şekil 2.39. Çevresel titreşim testleri için ölçüm alınan noktalar ve referans ivmeölçer konumu

İvmeölçerlerden gelen ham verinin toplanması ve işlemek üzere bilgisayar ortamına aktarılması amacıyla veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesi B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 1.17). Bu veri toplama ünitesi çok sayıda ölçüm noktasının dikkate alındığı durumlarda referanslı ölçümlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Yapılan çevresel titreşim testlerinde, ivmeölçerlerin tanıtılması, ham titreşim verilerinin depolanması, sinyal koşullandırma işlemlerinin yürütülmesi ve sinyal işleme programına aktarılması için B&K firması tarafından üretilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımı kullanılmıştır (OMA 2006). Deney numunelerinin ortam titreşim testlerine ait görseller Şekil 2.40’da verilmiştir.



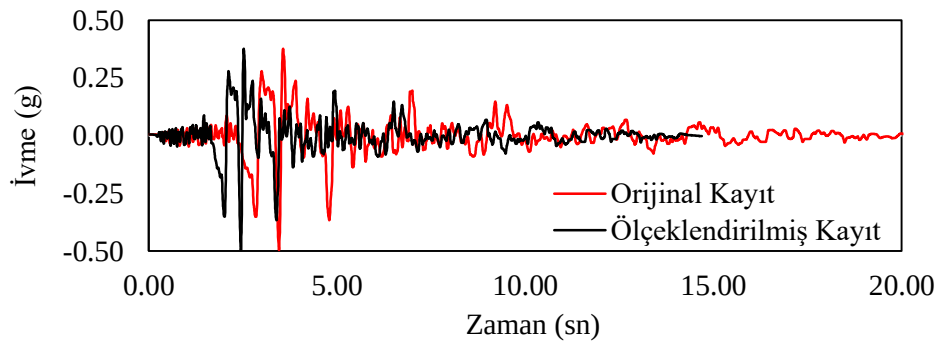
Şekil 2.40. Çevresel titreşim testlerine ait görseller

2.6. Yer Hareketlerinin Belirlenmesi ve Ölçeklendirilmesi

Bu bölümde, sarsma masası deneylerinde kullanılan yer hareketlerinin belirlenmesi ve sarsma masası deneyleri için ölçeklendirilmesi amaçlanmıştır. Geçmiş yıllarda meydana gelmiş depremlerden elde edilen ivme kayıtları için, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center) (PEER, 2022) veri bankası kullanılmıştır. Sarsma masası deneylerinde kullanılacak yer hareketlerini belirlemek için birçok çarpışma analizi ve çarpışma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, Ülkemizde geçmiş yıllarda meydana gelmiş 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin yanı sıra 1989 Loma Prieta, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri gibi

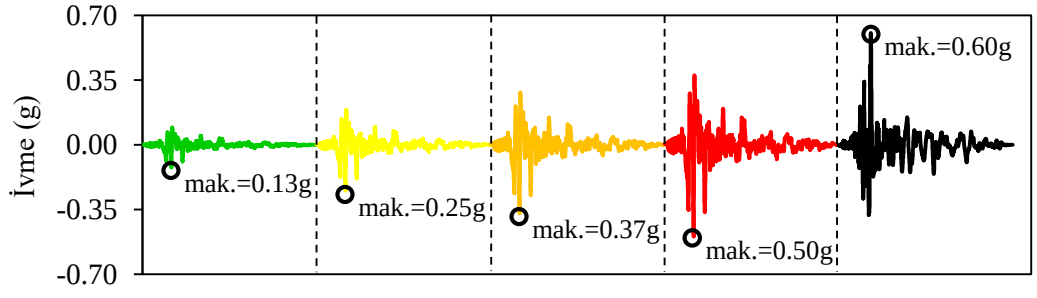
yıkıcı depremler de dikkate alınmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, deneyler sırasında yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ivme kaydı kullanılmıştır.

Deneyler esnasında ölçekli deney numuneleri kullanıldığı için bu ivme kaydının da ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Tablo 2.1’de verilen ölçeklendirme esaslarına göre deprem verisinin genlik ölçeği “1” olarak dikkate alınmaktadır. Ancak deprem verisinin zaman eksenini, deneyler için belirlenen ölçek katsayısının karekökü ile ölçeklendirilmektedir. Bu bilgiler ışığında deneyler esnasında seçilen yer hareketinin ivme genliğinde herhangi bir ölçeklendirme yapılmamış olup zaman eksenini seçilen ölçek katsayısının 1/2 olması sebebiyle 1.41 ($\sqrt{2}$) ile bölünmüştür. Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ölçeklendirilmiş ve ölçeklendirilmemiş ivme-zaman grafiği Şekil 2.41 ile sunulmuştur.

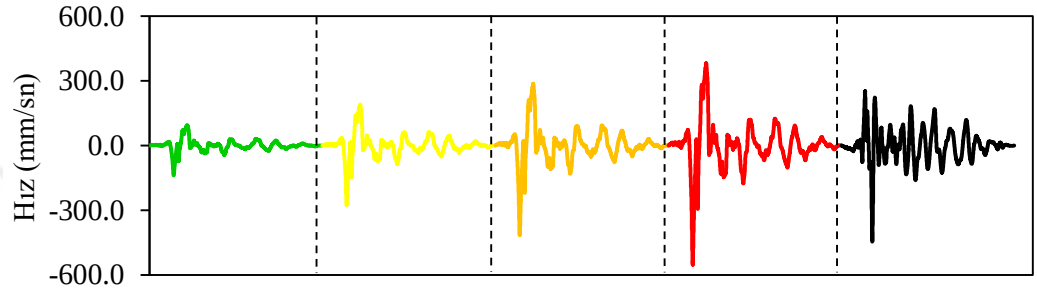


Şekil 2.41. 1992 Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ölçeklendirilmiş ve ölçeklendirilmemiş ivme-zaman grafiği

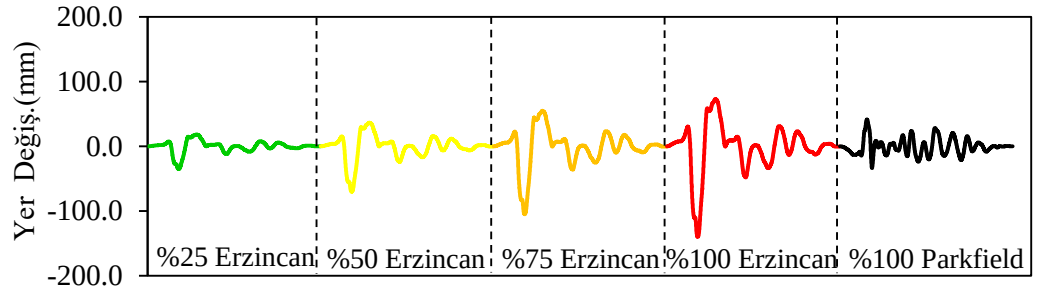
Deneyler sırasında bu kaydın 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artırımlı olarak uygulanmıştır. Öte yandan Erzincan depremi ile gerçekleştirilen artırımlı sarsma masası deneyleri sonrasında numunelerdeki hasar seviyelerinin daha da artırılması amacıyla 2004 Parkfield depreminde Parkfield-Fault Zone 1 istasyonunda kaydedilmiş bir ivme kayda da kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen ölçeklendirme prosedürü bu ivme kaydı içinde yürütülmüştür. İvme kayıtlarına ait özellikler Tablo 2.8’de spektral ivme, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri ise Şekil 2.42’de sunulmuştur.



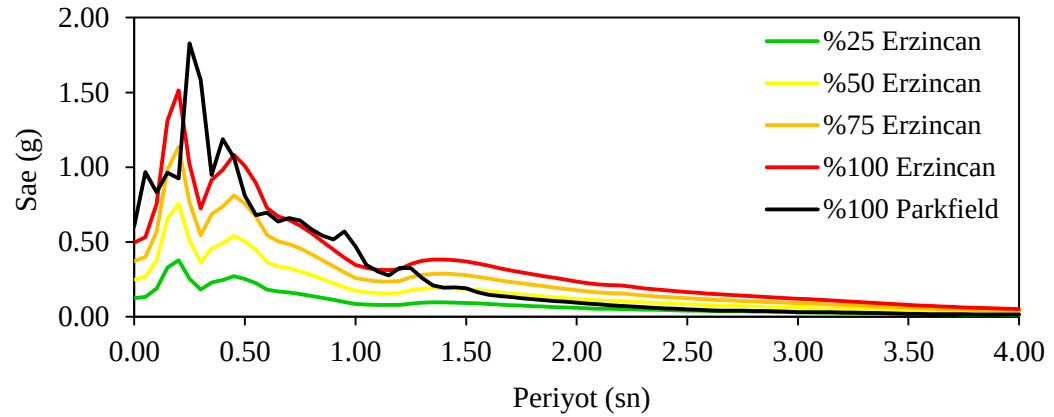
a. İvme



b. Hız



c. Yer değiştirme



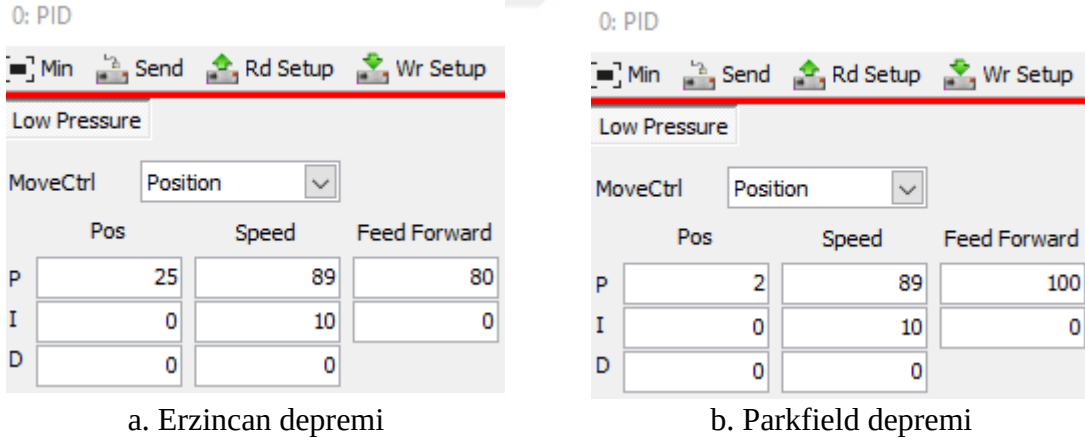
d. Spektral ivme (%5 sönüm oranı için)

Şekil 2.42. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme grafikleri

Tablo 2.8. Deneylerde kullanılan yer hareketlerine ait özellikler (PEER, 2022)

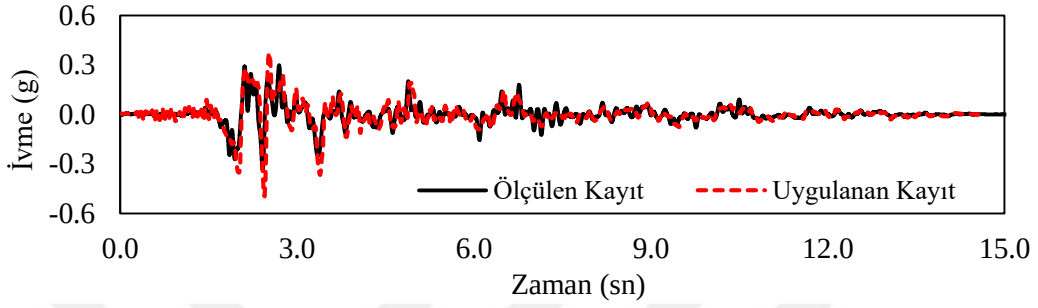
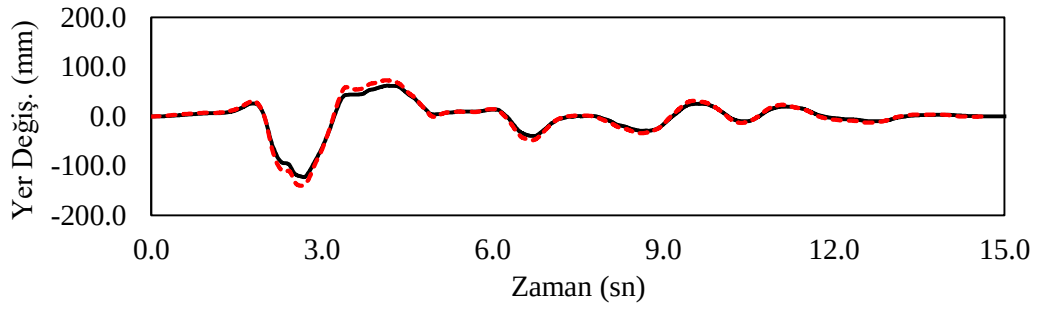
No	Deprem	Yıl	İstasyon	Yön	M _w	Mekanizma	R _{jb} (km)
1	Erzincan	1992	Erzincan	E-W	6.69	Doğrultu atımlı	4.38
2	Parkfield-02	2004	Parkfield-Fault Zone 1	COW090	6.00	Doğrultu atımlı	2.51

Seçilen ve ölçeklendirilen ivme kayıtlarının tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler için uygunluğu pilot deneysel çalışmalar bölümünde detayları sunulan deneysel çalışmalar ile kontrol edilmiş olup deneyler neticesinde çarpışma etkilerini belirgin bir şekilde ortaya çıkardığı görülmüştür. Ancak yine de çarpışma davranışının elde edilememesi durumuna karşı 0.10g ile 1.00g arasında pik ivme değerlerine sahip olan ölçeksiz ve ölçekli 20 farklı deprem kaydı hazırlanmış, sarsma masasında uygulanmış ve PID (Proportional, Integral, Derivative) ayarları da yapılarak hazır hale getirilmiştir. PID ayarları uygulanan yer hareketiyle sarsma masası üzerinde oluşan yer hareketinin uyumunu sağlamak amacıyla kullanılan bir kontrol mekanizmasıdır. Deneylerde kullanılan ve ölçeklendirilen yer hareketlerinin PID ayarlarına ait görseller Şekil 2.43'te verilmiştir.

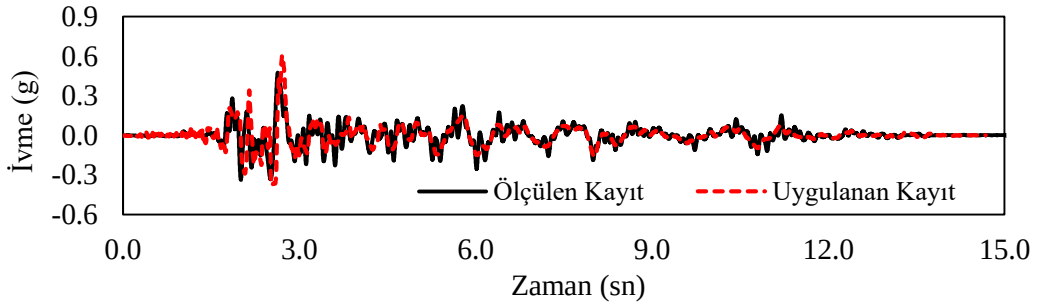
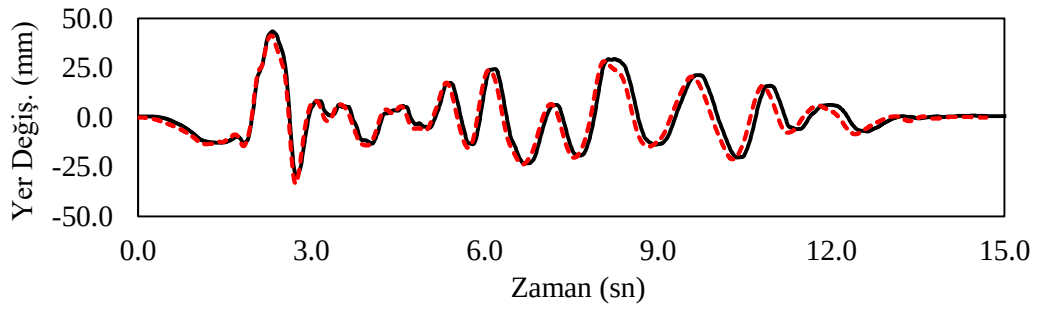


Şekil 2.43. Sarsma masası PID ayarları

Uygulanan yer hareketiyle sarsma masası üzerinde oluşan yer hareketinin uyumunu göstermek amacıyla Şekil 2.44'te Erzincan ve Parkfield depremillerinin ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarının, uygulanan ve ölçülen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri sunulmuştur. Görüleceği üzere sarsma masasına uygulanan ve sarsma masasından ölçülen değerler arasında önemli farklılıklar bulunmamaktadır.



a. %100 Erzincan depremi



b. %100 Parkfield depremi

Şekil 2.44. Uygulanan ve sarsma masasından ölçülen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

2.7. Pilot Deneyler ile Deney Düzeneklerinin Uygunluğunun Değerlendirilmesi

Sarsma masası deneylerinde test süresinin oldukça kısa olması ve deney maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle deneyler öncesi gerçekleştirilecek çalışmalar oldukça önem kazanmaktadır. Bu aşamada yapılacak çalışmalar deneyin amacına ulaşması açısından kritik

öneme sahiptir. Dolayısıyla numunelerin tasarımından sarsma masası deneylerinin gerçekleştirilmesine kadarki tüm işlem adımları dikkatli bir şekilde yürütülmelidir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında, deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin, deneyler sırasında kullanılan ölçüm sistemlerinin ve deneyler sırasında elde edilen yapısal tepkilerin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla pilot sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerde Günaydın (2016) ve Karahasan (2017) tarafından üretilen ve deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilen çalışmalarda 2 adet betonarme deney numunesi kullanılmıştır. Bu deney numuneleri, betonarme binaların dinamik davranışına lifli polimer kompozit malzeme etkisinin tahribatsız yöntemlerle araştırılması amacıyla geçmiş yıllarda üretilen 3 boyutlu betonarme bina modelinden oluşturulmuştur. Bu deney numunelerinin tasarımında da bu tez çalışmasına benzer olarak, Ülkemizin kentsel yapı stokunun büyük çoğunluğunu oluşturan betonarme binaları temsil etmek amacıyla sıklıkla karşılaşılan yetersizlikler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda dikkate alınan yetersizlikler ve tasarım hataları: (i) düşük beton dayanımı, (ii) yetersiz sargı donatısı, (iii) birleşim bölgelerinde sıklaştırma yapılmaması, (iv) donatı kenetlenme boylarının yetersiz olmasıdır. Bu numunelerin tasarımında, beton sınıfı temel için C16/20 ($f_{ck}=16\text{MPa}$), diğer taşıyıcı sistem elemanlarında C12/15 ($f_{ck}=12\text{MPa}$) olarak düşünülmüştür. Donatı sınıfı olarak B420C inşaat çeliği seçilmiştir.

Pilot deneylerdeki betonarme düzlem çerçeve deney numuneleri 2 açıklıklı ve 2 katlıdır. Her bir açıklık 1.40m'dir. Ayrıca kat yüksekliği 1.70m olarak dikkate alınmıştır. Kolon boyutları tüm katlarda 15.00×20.00cm ve 20.00×15.00cm'dir. Bütün kolonlarda 4φ10 nervürlü boyuna donatı ve φ8/25 nervürlü enine donatı kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşim noktalarında etriye sıklaştırılması yapılmamıştır. Numunelerde kiriş boyutları 15.00×20.00cm'dir. Bütün kirişlerde boyuna donatı olarak altta ve üstte 2φ10'luk nervürlü donatılar kullanılmıştır. Kirişlerde enine donatı olarak 8.00mm çapında nervürlü donatı 25.00cm aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Bu deney numuneleri tek bir temel üzerinde inşa edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında numunelerin temelleri karot makinesi vasıtasıyla ayrılmıştır. Böylece numunelerin temelleri 40.00cm genişliğinde ve 30.00cm yüksekliğinde şerit temel haline getirilmiştir. Her bir numunenin temelinin üzerinde 6 farklı noktada karot makinesi ile 30.00mm çapında delikler açılarak numunelerin sarsma masası üzerine sabitlenmesinde kullanılacak bağlantı elemanları için boşlukların bırakılması amaçlanmıştır. Bunlara ek olarak numunelerin sarsma masası üzerinde tam bağlı olabilmesi için 4 adet U100 profil ve çelik takozlar yardımıyla da sarsma masası üzerine sabitlenmesi sağlanmıştır. Pilot

ayrılan ve sarsma masası üzerine teşkil edilen iki deney numunesine ait görseller Şekil 2.46'da sunulmuştur.

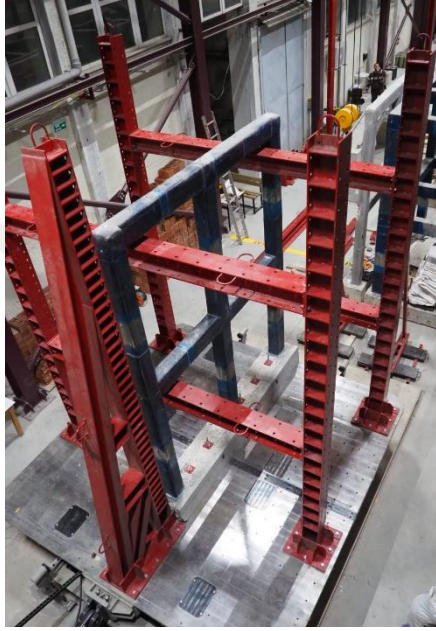


Şekil 2.46. Pilot deneylerde kullanılan deney numunelerine ait görseller

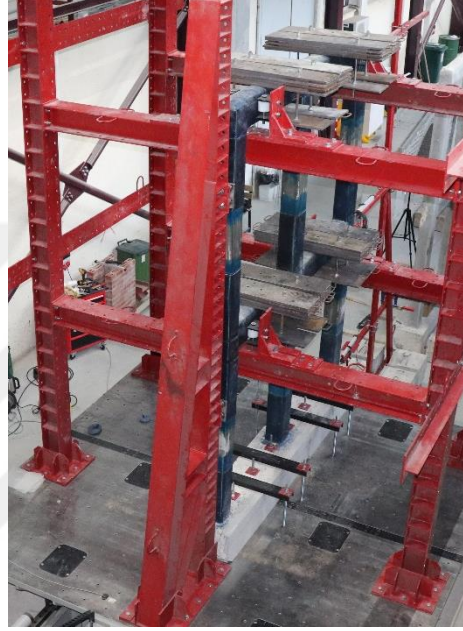
Daha önceki bölümlerde detayları verilen çarpışma duvarı, çarpışma elemanı, rulman sistemi ve deney düzeneğine ait diğer elemanların gerçekleştirilecek testler için uygunluğunu değerlendirmek amacıyla pilot deneylerde de esas deneylerde düşünülen deney düzeneği uygulanmıştır. Ancak esas deneylerden farklı olarak katlara ilave edilen kat kütleleri simülasyon esasları ile belirlenenden daha az olacak şekilde (her kata 1.0ton) kat kirişlerine sabitlenmiştir. Bunun nedeni çelik levhalardan üretilen ağırlıkların sabitlenmesi için pilot deney numunelerinde uygun bağlantı detaylarının bulunmamasıdır. Pilot deneyler için oluşturulan deney düzeneğine ait görseller Şekil 2.47'de verilmiştir.

Çarpışma türü olarak esas deneyler kapsamında da incelenecek olan kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması türü (kolon-döşeme çarpışması) dikkate alınmıştır. Yer hareketi olarak detayları daha önceki bölümlerde sunulan Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ölçeklendirilmiş ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 2.42). Esas deneylerde planlandığı üzere bu ivme kaydı artımlı olarak yapıya uygulanmış olup, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katı kullanılmıştır. Simülasyon kuralları gereği eklenmesi gereken kat kütlelerinin güvenlik gerekçeleri ile azaltılması nedeniyle bu ivme kayıtları ile gerçekleştirilen sarsma masası

deneylerinde istenilen düzeyde hasar elde edilememiştir. Bu nedenle 0.50g ve 0.75g en büyük ivme değerine sahip 3 adet sinüs dalgası da yer hareketi olarak uygulanmıştır. Her bir ivme kaydı çarpışmanın olmadığı, çarpışmanın olduğu ve kauçuk sönümleyicinin dikkate alındığı durumlar için art arda üç kez uygulanmıştır. Böylece toplamda 52 adet sarsma masası deneyi gerçekleştirilmiştir.



a. Çarpışma duvarı ve koruma çerçevesi



b. Kat ağırlıkları



c. Ayarlanabilir çarpışma elemanları



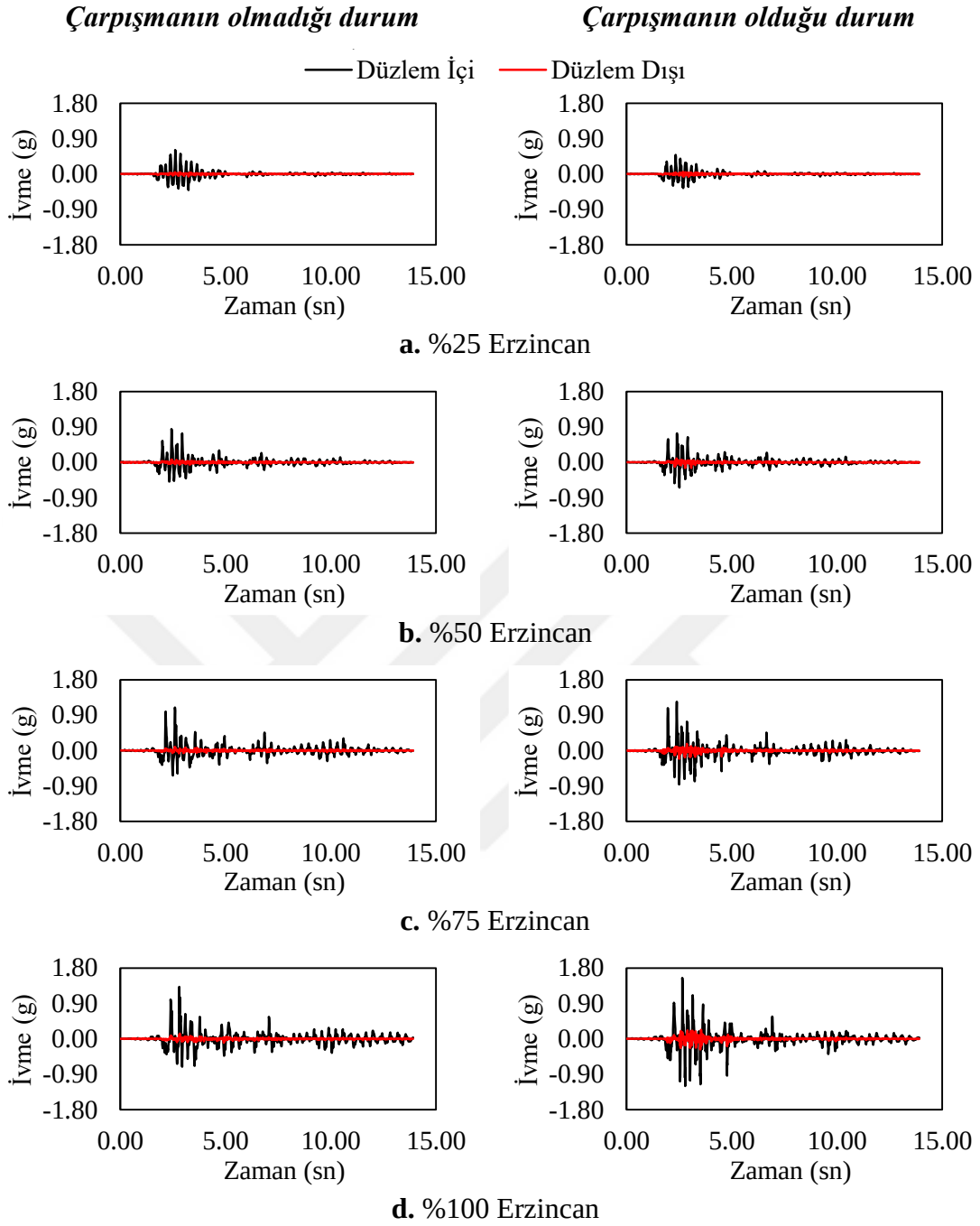
d. Rulman sistemi

Şekil 2.47. Pilot deneyler için kurulan deney düzeneğine ait görseller

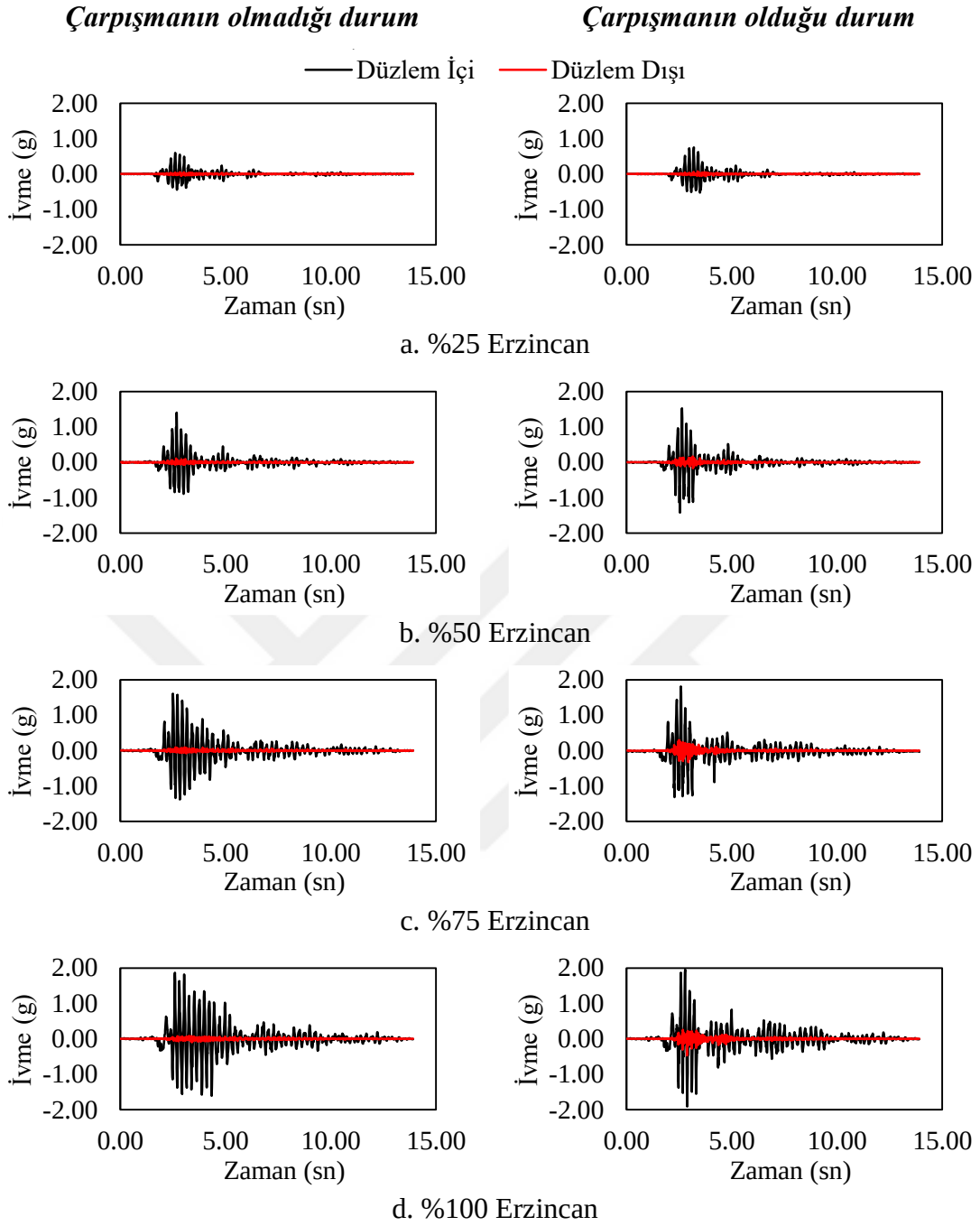
Deneyler esnasında betonarme numunelerde oluşacak yer değiştirme ve ivme değerleri, Şekil 2.36 ve Şekil 2.38’de verilen yerleşim planına benzer şekilde sistem üzerine yerleştirilen sensörler yardımıyla elde edilmiştir. Kullanılan bu sensörlere ait detaylar daha önceki bölümlerde verilmiştir. 3 adet LPDT binaların temelinin ve katlarının hareket

doğrultusundaki yer değiştirmelerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Betonarme numune ile rijit çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değiştirmeleri elde etmek için 2 adet LPDT kullanılmıştır. Çarpışmadan kaynaklı ani ivme değişikliklerini ve ivmelerdeki pikleri yakalayabilmek için 4.00kHz'e kadar ayarlanabilir örnekleme hızına sahip, $\pm 40.00g$ ölçüm kapasiteli 3 adet 3 eksenli kablosuz ivmeölçerler çarpışma bölgelerine yakın yerlere yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında bu ivmeölçerlerden toplanan verilerde hiçbir kesinti meydana gelmemiş olup tüm deneyler sorunsuz bir şekilde tamamlanmıştır. Binaların katlarının hareket doğrultusundaki ivmelerini ölçmek ve düzlem dışı hareketi kontrol etmek amacıyla toplamda 3 adet tek eksenli kablolu ivmeölçer kullanılmıştır. Esas deneylerde planlandığı gibi, pilot deneylerde de yapılan her sarsma masası deneyi öncesi ve sonrasında, alarak dinamik karakteristikler ÇTY ile belirlenmiş ve bunların hasarla değişimi izlenmiştir. Bu amaçla, kolon kiriş tüm birleşim bölgelerinin tamamında, kolon orta bölgelerinde ve çarpışma bölgelerinde olmak üzere toplam 32 noktadan ölçüm alınmıştır.

Düzlem çerçeve numuneler ile gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde, elde edilen düzlem dışı hareketin mertebesinin düzlem için harekete kıyasla düşük olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında bunu sağlamak amacıyla 8 adet rulman sistemi oluşturulmuştur (Şekil 2.25 ve Şekil 2.47d). Rulman sisteminin düzlem dışı hareketi engellemekteki etkisini ortaya koymak amacıyla, pilot deneyler sırasında hareket doğrultusuna dik doğrultuda (düzlem dışı) oluşan ivmeler ve hareket doğrultusunda (düzlem içi) oluşan ivmeler kıyaslanmıştır. Bu ivme değerleri Şekil 2.48 ve Şekil 2.49'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 2. kat düzlem dışı ivme değerleri, düzlem içi ivmelere kıyasla oldukça düşük düzeyde olduğu ve oluşturulan deney düzeneğinin sunulan çalışmanın amacına ulaşması açısından uygun olduğu görülmektedir.



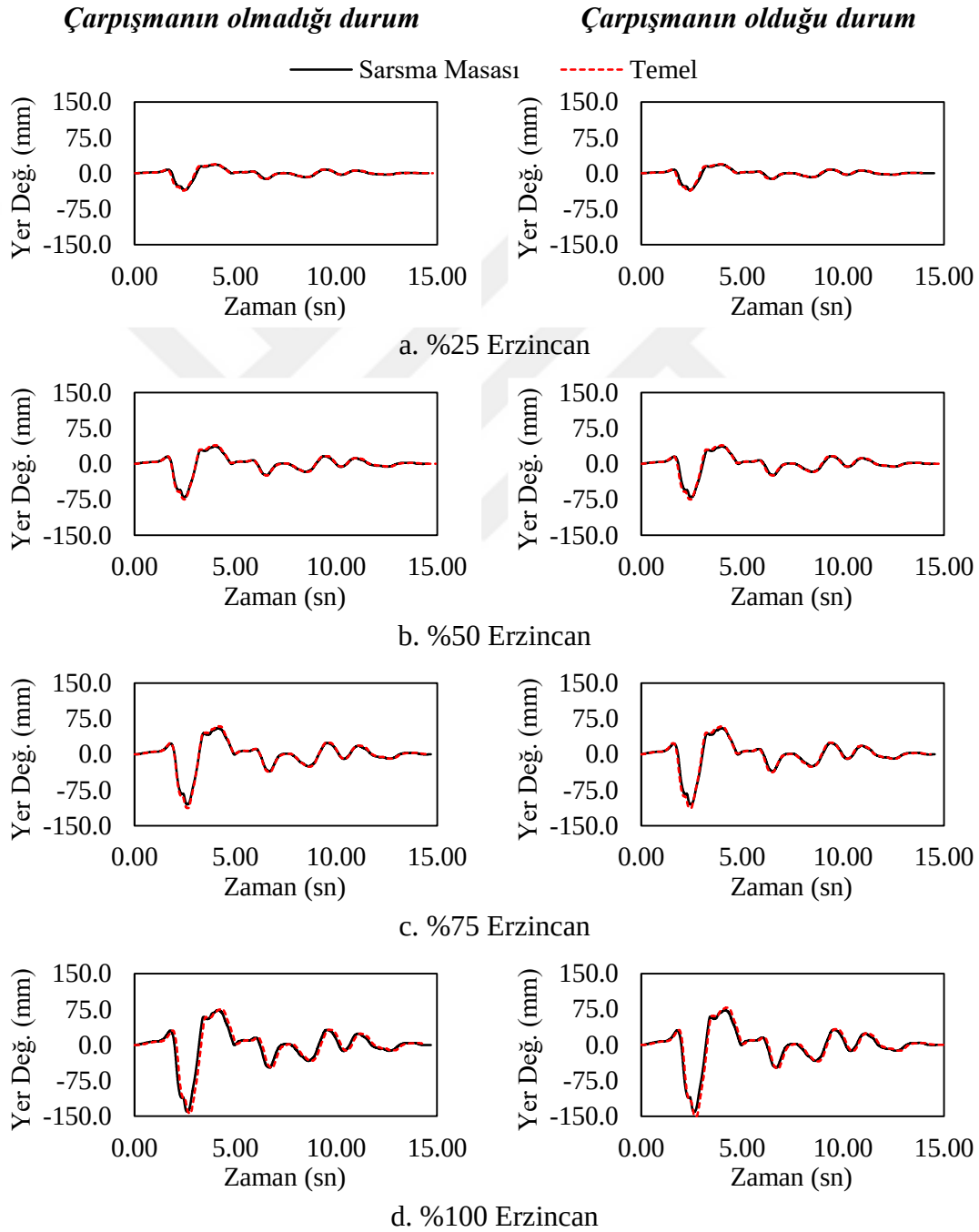
Şekil 2.48. Güçlendirilmemiş deney numunesinde düzlem içi ve dışı ivmelerin karşılaştırılması



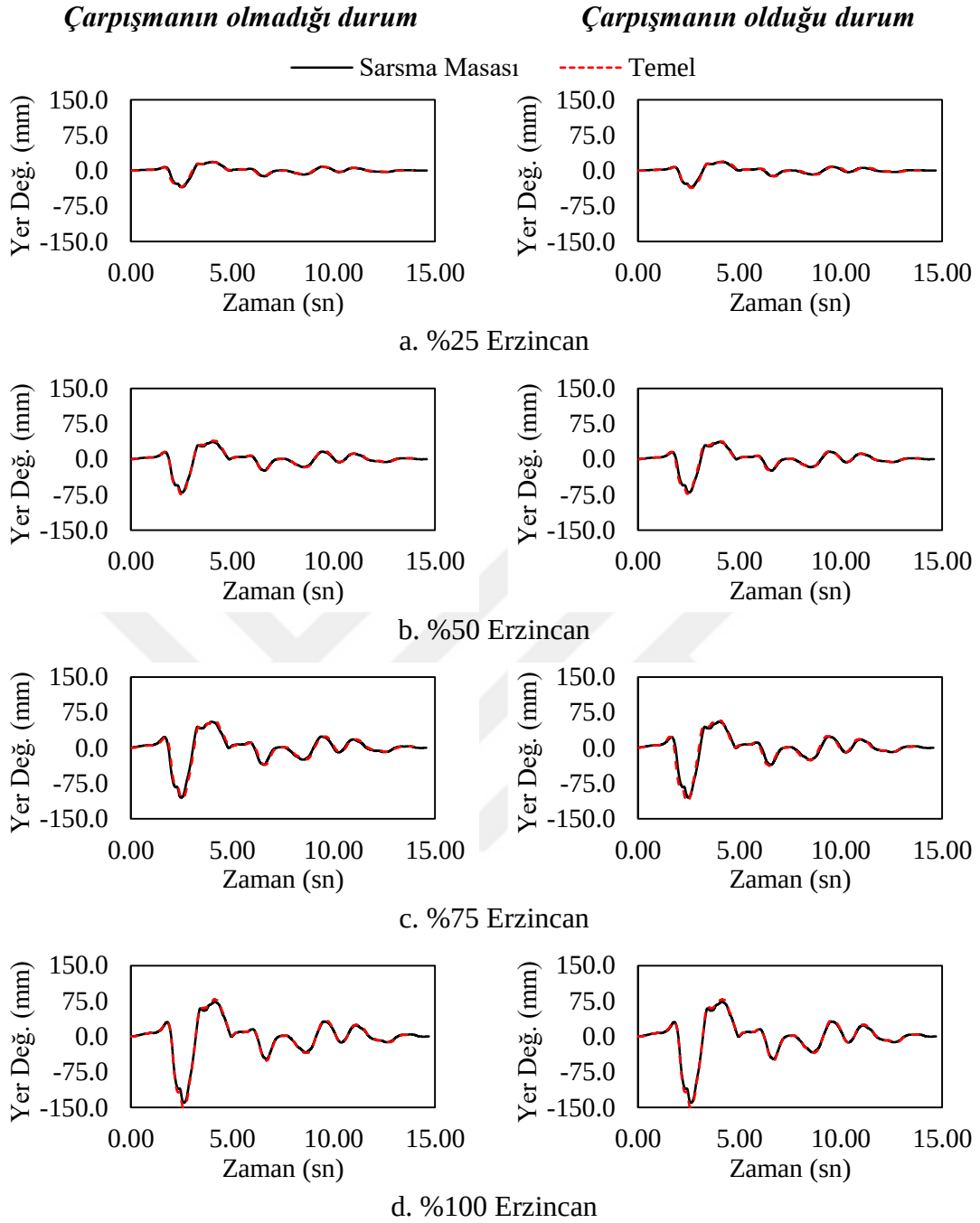
Şekil 2.49. Güçlendirilmiş deney numunesinde düzlem içi ve dışı ivmelerin karşılaştırılması

Sarsma masası deneyleri sırasında temellerin hareketini kontrol etmek amacıyla temel seviyesindeki LPDT verileri ile uygulanan yer hareketinin yer değiştirme değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 2.50 ve Şekil 2.51). Pilot deneylerde sarsma masası ve temel bağlantısı için her bir deney numunesinde 6 adet M20 tij ve 4 adet U100 profil kullanılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, temel seviyesindeki yer değiştirme grafiği ile

sarsma masasına uygulanan ivme kaydının yer değiştirme grafiğinin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Esas deneylerde numunelerin sarsma masası üzerine sabitlenmesinde pilot deneylere kıyasla çok daha fazla tij (16 farklı noktada M20 tij) ve 4 adet U100 profil kullanılmıştır. Kullanılan bağlantı elemanlarının ve sayısının sunulan çalışmanın amacına ulaşması açısından yeterli olduğu görülmektedir.



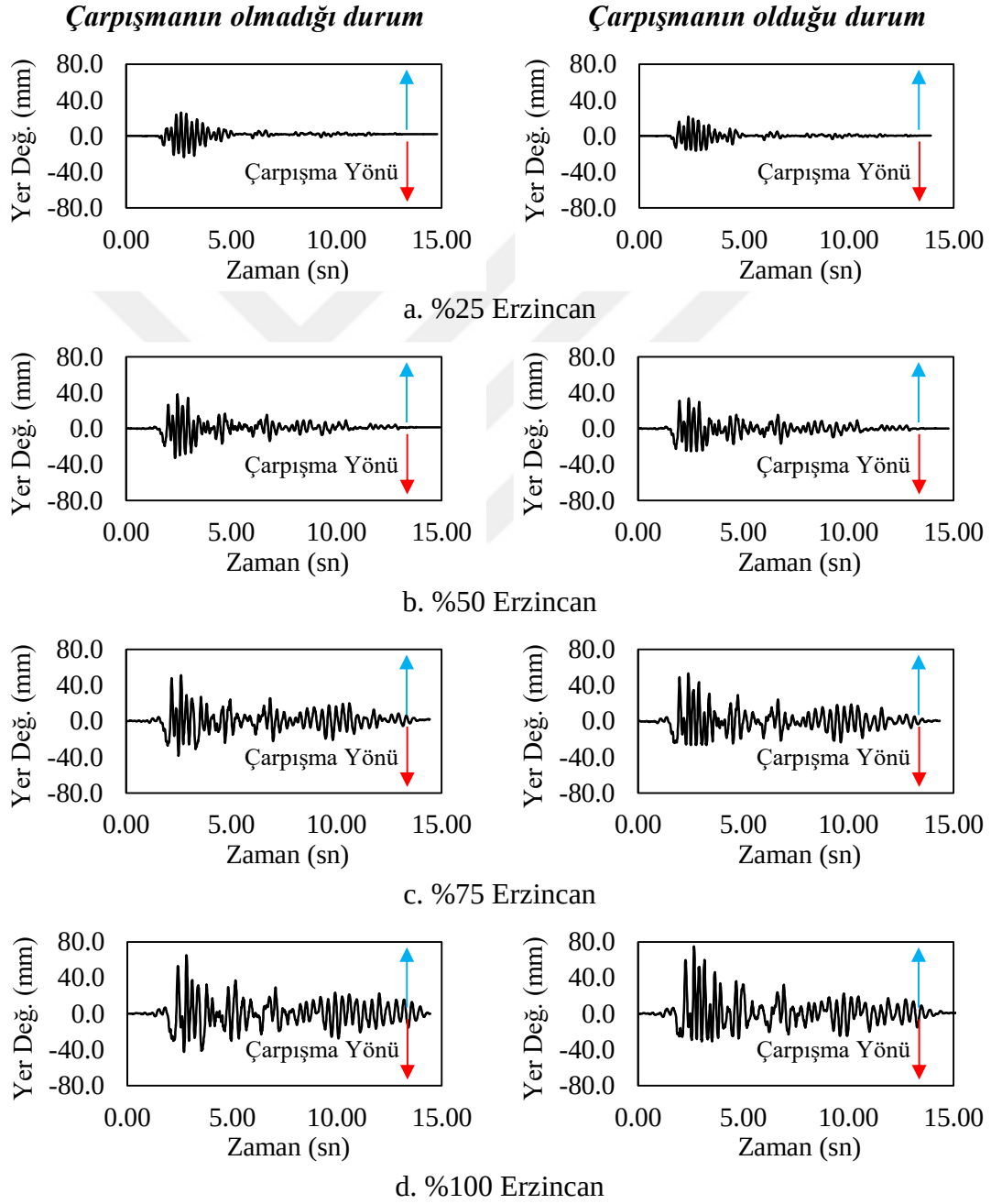
Şekil 2.50. Güçlendirilmemiş deney numunesinde sarsma masası ve temel yer değiştirmelerinin karşılaştırılması



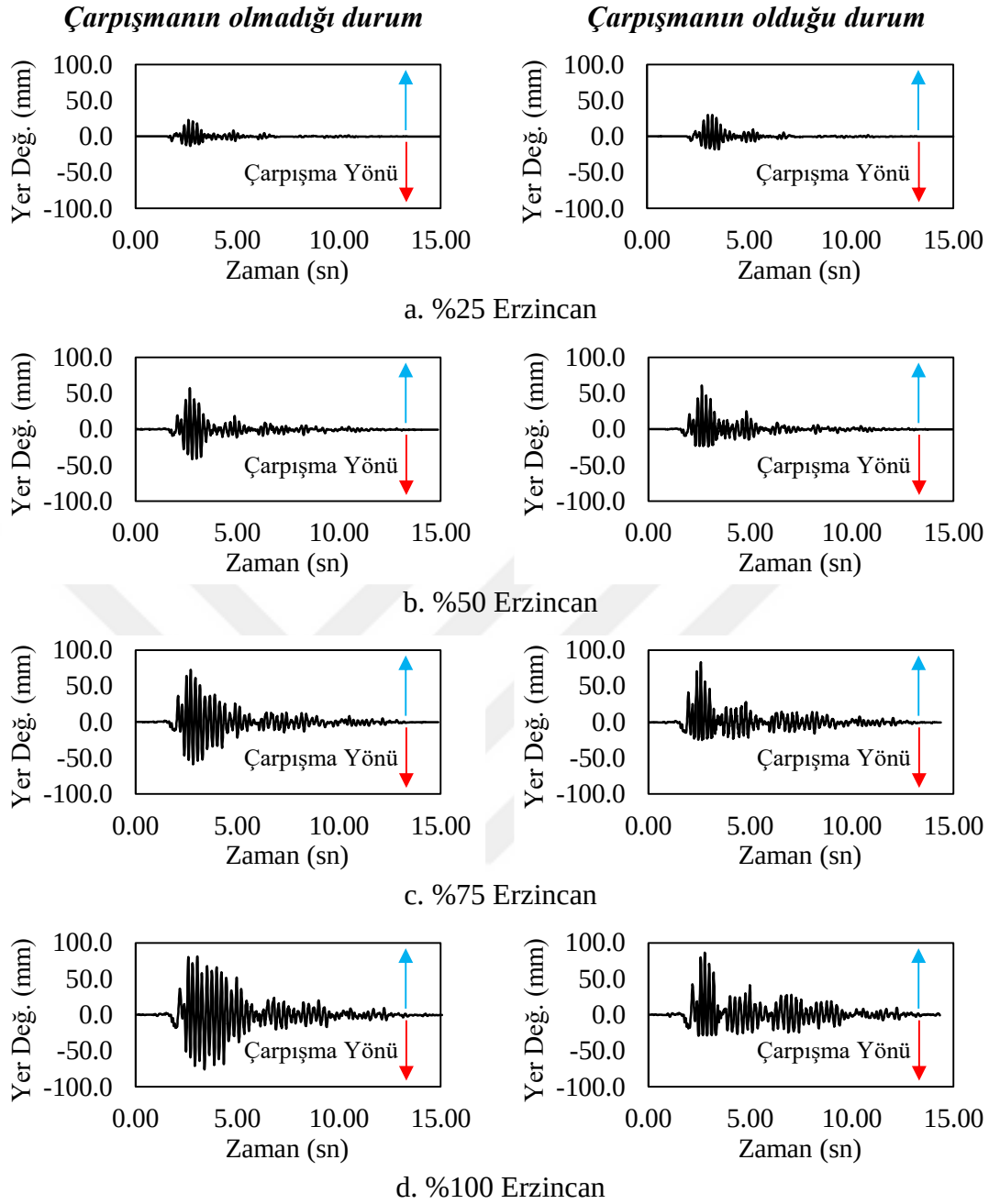
Şekil 2.51. Güçlendirilmiş deney numunesinde sarsma masası ve temel yer değiştirmelerinin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde betonarme deney numunesi ile çarpışma duvarı arasındaki boşluk miktarı dikkate alınan her bir deprem düzeyi için çarpışmanın gerçekleşmesini sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu amaçla pilot deneylerde elde edilen veriler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda hem pilot hem de esas deneylerde 5.00mm derz miktarı dikkate alınmıştır. Şekil 2.52 ve Şekil 2.53'te pilot deneylerde

çarpışma duvarı ve deney numunesi arasında elde edilen 2. kat seviyesindeki görelî yer değıştirme değeri verilmıştir. Dikkate alınan her bir deprem düzeyi için çarpışmanın meydana geldiğı yöndeki yer değıştirme değeri çarpışma nedeniyle baskılandığı Şekil 2.52 ve Şekil 2.53'ten görölmektedir. Dolayısıyla seçilen derz miktarının dikkate alınan tüm deprem seviyelerinde çarpışmanın meydana gelmesi için yeterli olduğı görölmektedir.



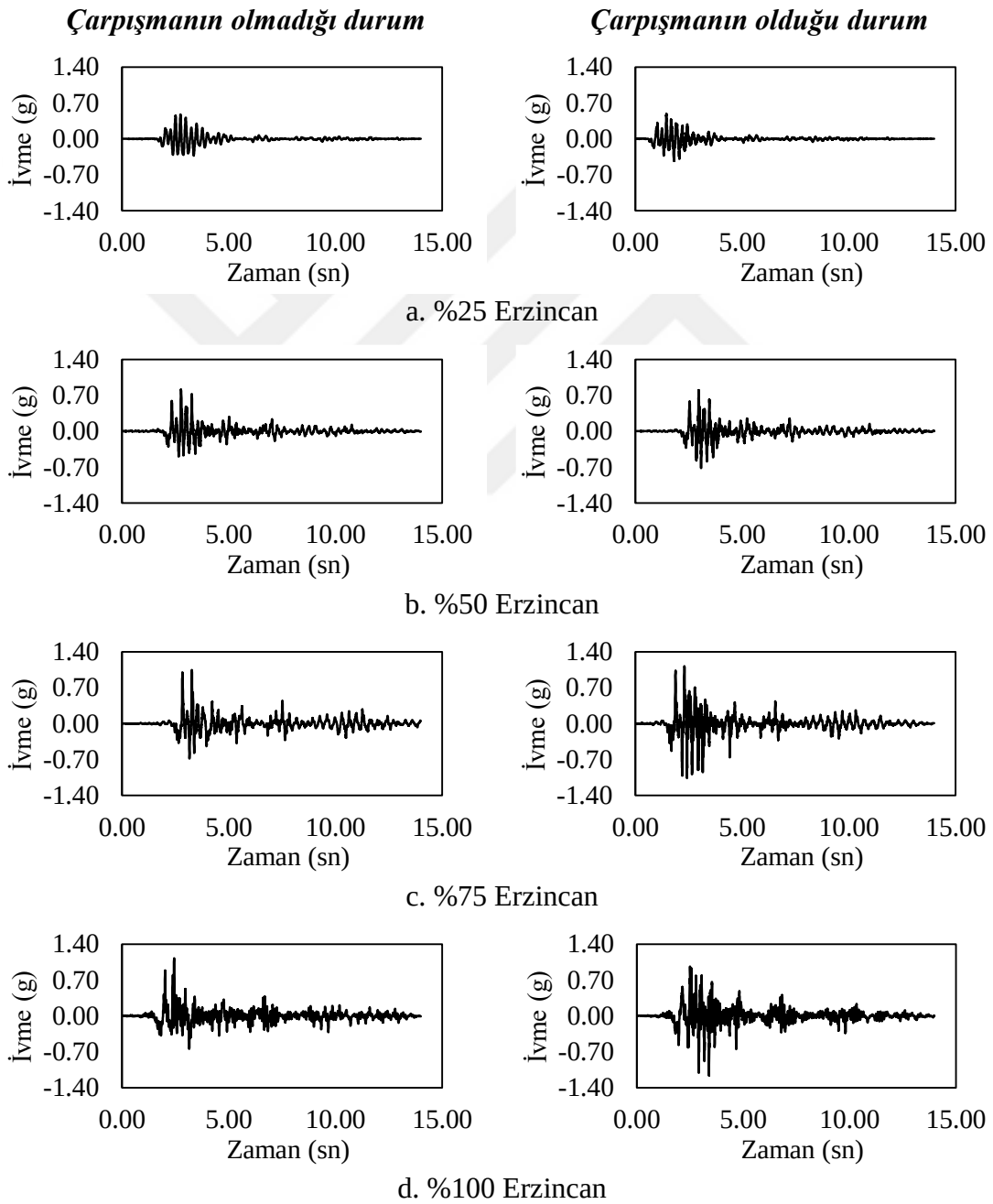
Şekil 2.52. Güçlendirilmemiş deney numunesi ve çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değıştirmelerin karşılaştırılması



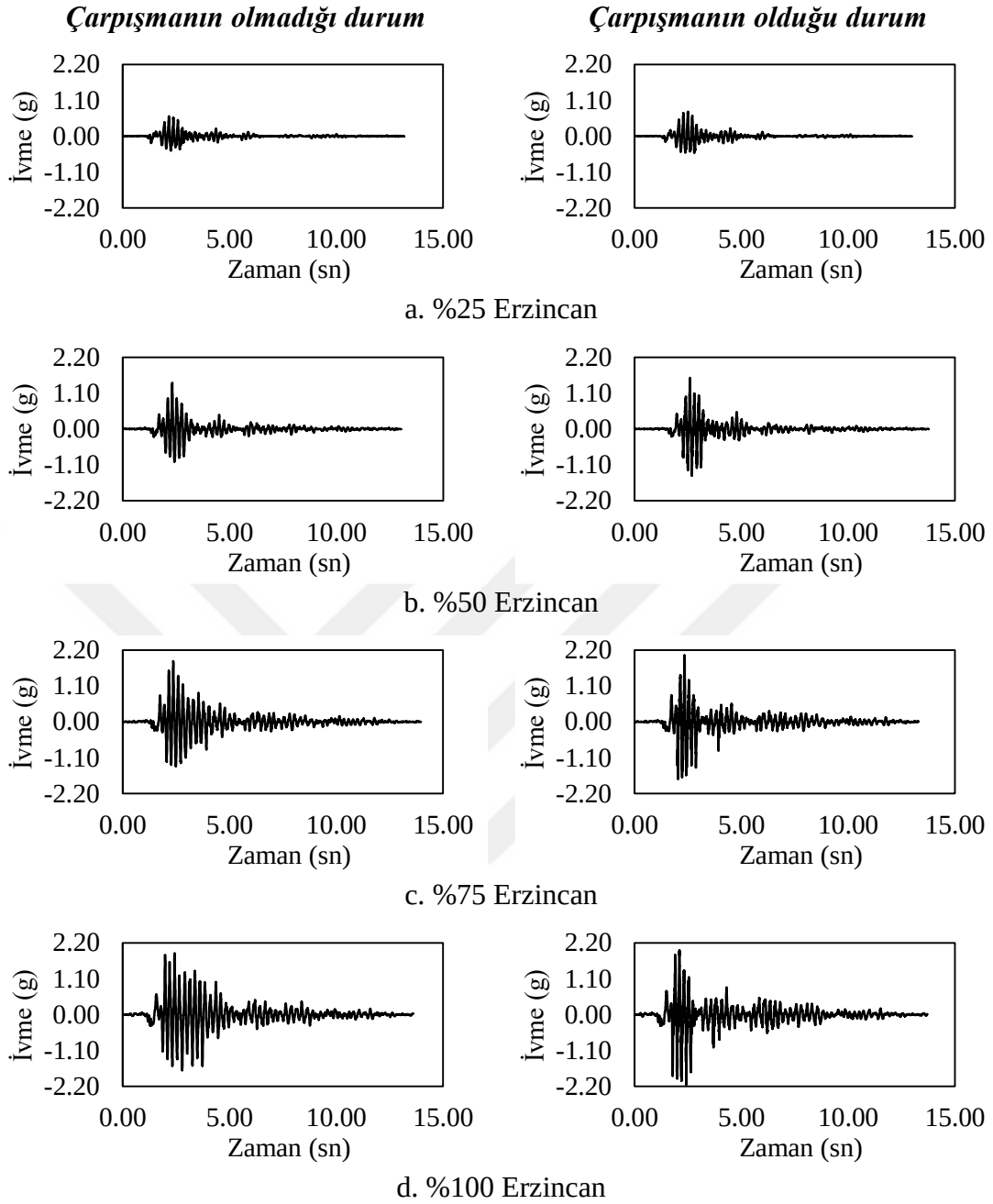
Şekil 2.53. Güçlendirilmiş deney numunesi ve çarpışma duvarı arasındaki görelî yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Şekil 2.54 ve 2.55’te pilot deneyler sırasında çarpışmanın dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda elde edilen ivme değerleri sunulmuştur. En büyük ivme değerlerinin 2. kat seviyesinde çarpışma bölgesindeki ivmeölçerden elde edilmesi nedeniyle bu veriler kıyaslanmıştır. Komşu binaların çarpışması sırasında hızda meydana gelen ani değişiklikler, ivme değerlerinde kısa süreli pikler oluşmasına neden olmaktadır. Bu pikler oldukça kısa süreli olması nedeniyle deneyler sırasında oluşan değişimlerin yakalanması oldukça

önemlidir. Çarpışma deneyleri esnasında ani ivme değişikliklerini ve çarpışma sırasında ivmelerdeki pikleri yakalayabilmek için çarpışma bölgelerine yakın bölgelerde $\pm 40.00g$ ölçüm kapasiteli 3 eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Şekil 2.54 ve 2.55'ten de görüleceği üzere çarpışmalar ivme değerlerinde ilave piklere neden olmaktadır. Seçilen derz miktarının dikkate alınan tüm deprem seviyelerinde çarpışmanın meydana gelmesi için yeterli olduğu ve kullanılan ivmeölçerlerin tepkileri yakalama açısında uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 2.54. Güçlendirilmemiş deney numunesinde ivmelerin çarpışma ile değişimi



Şekil 2.55. Güçlendirilmiş deney numunesinde ivmelerin çarpışma ile değişimi

Pilot deneyler için gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında ÇTY ile ortam titreşim testleri gerçekleştirilmiş olup numunelere ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında güçlendirilmemiş deney numunesinin frekans değerlerinde hasarsız duruma göre %50'den fazla azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Uygulanan son sarsma masası deneyinde çarpışmanın meydana geldiği kolonun göçmesi nedeniyle deney numunesi kullanılamaz hale gelmiştir. Lifli polimer kompozit ile güçlendirilen deney numunesinde ise frekans değerlerindeki azalma %20

civarında kalmıştır. Ayrıca deney sonunda taşıyıcı sistem elemanlarında herhangi bir hasar gözlenmemiş olup sadece kolon-temel birleşim bölgesinde hasarlar gözlenmiştir. Güçlendirilmemiş deney numunesinde gözlemlenen bazı hasarlar Şekil 2.56’da, çarpışma bölgesindeki kolonda meydana gelen hasarlar ise Şekil 2.57’de gösterilmektedir. Şekil 2.56’da görüleceği üzere pilot deneyler ile elde edilen hasarların gerçek binalarda gözlemlenen hasarlarla uyumludur.



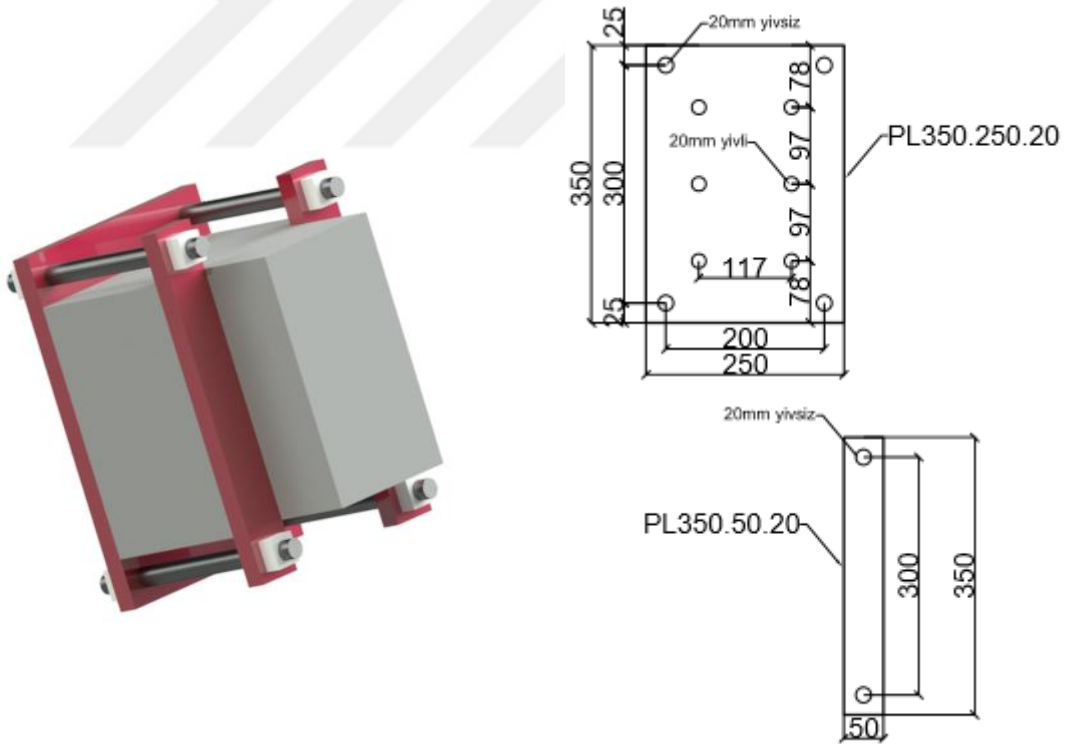
Şekil 2.56. Pilot deneyler sonrası güçlendirilmemiş numunede meydana gelen hasarlar



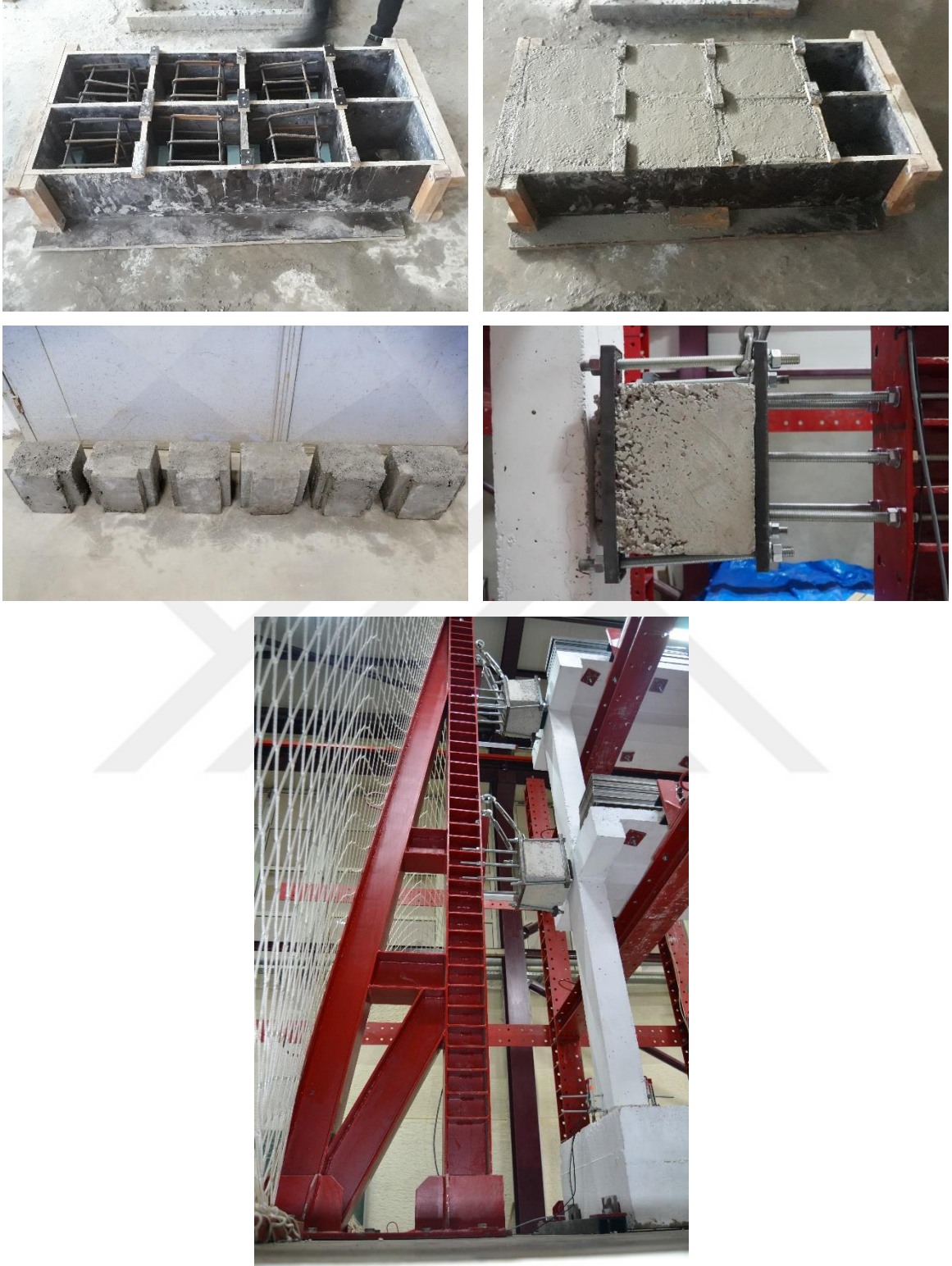
Şekil 2.57. Pilot deneylerde güçlendirilmemiş numunenin çarpışma bölgesinde meydana gelen hasarlar

Çarpışma bölgesinde, çelik çarpışma elemanı ile betonarme kolonun etkileşimi sonucu oluşan hasarların çekiçlemeden daha çok darbe benzeri hasarlara neden olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.57). Bu durum çarpışma elemanlarının çelik malzeme ile üretilmesinden ve kolon yüzeyine kıyasla çok daha küçük yüzey alanına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Jankowski (2010) gerçekleştirdiği serbest düşme ve küçük ölçekli sarsma masası deneyleri sonucunda çarpışan elemanlar için kullanılan malzemenin, depremler sırasında yapıların davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, çelik malzeme ile üretilen elemanların çarpışma rijitlikleri nedeniyle daha yüksek yapısal tepkilere neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Dolayısıyla, pilot deneyler sonucunda çelik malzeme ile üretilen çarpışma elemanlarının, betonarme çarpışma elemanları ile değiştirilmesine karar verilmiştir. Betonarme binalar ile çarpışma duvarı

arasındaki çarpışma yüzeyini oluşturabilmek ve derz miktarının hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için betonarme bir kütle ve bunun sabitlendiği çelik elemanlar ile bir çarpışma elemanı tasarlanmıştır. Bu eleman, çarpışma duvarı üzerindeki delikler ve kullanılan yivler ile istenilen konumda ve istenilen derz mesafesinde çarpışma testlerinin yapılmasına olanak vermektedir. Bu çarpışma elemanı şu bileşenlerden oluşmaktadır: (i) bir adet betonarme kütle ($300.00 \times 300.00 \times 300.00$ mm), (ii) 4 adet 18.00mm çapında ve 300.00mm uzunluğunda gijon tij, (iii) 6 adet 20.00mm çapında ve 300.00mm uzunluğunda gijon tij, (iv) üzerinde 6 adet 20.00mm yivli delik bulunan $350.00 \times 250.00 \times 20.00$ mm ebatlarında S235JR kalite çelik levha, (v) üzerinde 2 adet 20.00mm delik bulunan $350.00 \times 50.00 \times 20.00$ mm ebatlarında S235JR kalite iki adet çelik levha. Tasarımı yenilenen çarpışma elemanına ait üç boyutlu görünümü Şekil 2.58’te verilmiştir. Çarpışma elemanındaki betonarme kütle için üretimine ve yenilenen çarpışma elemanı ait görseller Şekil 2.59’da sunulmuştur.



Şekil 2.58. Yeniden tasarlanan çarpışma elemanına ait boyutlar ve üç boyutlu görünüm



Şekil 2.59. Yeniden tasarlanan çarpışma elemanının üretimine ve yerleşimine ait görseller

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Giriş

Tez çalışmasının bu bölümünde, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen aletsel büyüklükler (ivme, yer değiştirme, taban kesme kuvvetleri vb.) ve bulgular ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ölçekli betonarme deney numuneleri kullanılarak sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile birlikte binaların farklı çarpışma türleri için çarpışma davranışlarının belirlenmesi, çarpışma sonrası oluşacak hasarların binaların performanslarına olan etkilerinin deneysel yöntemler kullanarak incelenmesi ve çarpışma etkilerini azaltmak için kullanılabilecek yöntemler araştırılmaya çalışılmıştır. Tez çalışması kapsamında yürütülecek esas deneylere geçmeden önce 2 adet betonarme deney numunesi ile pilot deneyler gerçekleştirilmiştir. Pilot deneylerin amacı deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin, deneyler sırasında kullanılan ölçüm sistemlerinin ve deneyler sırasında elde edilen yapısal tepkilerin uygunluğunun değerlendirilmesi olduğundan dolayı bu bölümde pilot deneylere ait bulgulardan bahsedilmemiştir. Tez kapsamında 5 adet betonarme deney numunesi kullanılarak esas deneyler yürütülmüştür. Çarpışma deneyleri için takip edilen deney organizasyonunun ana hatları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Referans Deney: Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı durumda gerçekleştirilen sarsma masası deneyleridir.
- Deney-1 (Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması): Deney numunesi ile rijit çarpışma duvarı arasındaki döşeme-kolon çarpışmasının etkilerinin takip edildiği sarsma masası deneyleridir.
- Deney-2 (Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması): Tek bir katta meydana gelen döşeme-döşeme çarpışmasının yapısal davranış ve hasar mekanizması üzerindeki etkilerinin araştırıldığı deneylerdir.
- Deney-3 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması): Deney numunesi ile rijit çarpışma duvarı arasındaki döşeme-döşeme etkileşiminin neden olduğu yapısal tepkilerin ve hasarların incelendiği sarsma masası deneyleridir.

- Deney-4: Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk sönümleyiciler teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneyleridir.

Çarpışma deneyleri Bölüm 2.7’de ayrıntıları verilen gerçek ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda deneyler sırasında yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ivme kaydı kullanılmıştır. Deneyler sırasında bu kaydın 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artırımlı olarak uygulanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen artırımlı sarsma masası deneyleri sonrasında numunelerdeki hasar seviyelerinin artırılması amacıyla 2004 Parkfield depreminde Parkfield-Fault Zone 1 istasyonunda kaydedilmiş bir ivme kaydı da kullanılmıştır. Böylece farklı yoğunluğa sahip yer hareketleri altında komşu binalar arasındaki çarpışma davranışı incelenmeye çalışılmıştır. Ölçeklendirme kuralları gereği deneyler esnasında seçilen yer hareketinin ivme genliğinde herhangi bir ölçeklendirme yapılmamış olup zaman eksenini seçilen ölçek katsayısının 1/2 olması sebebiyle $1.41 (\sqrt{2})$ ile bölünmüştür (Şekil 2.41).

Bu tez çalışması kapsamında yapılan her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında, yapılarıdaki titreşimleri dikkate alan ve tahribatsız bir yöntem olan Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY) ile frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Bu süreçte aşağıda belirtilen işlem adımları takip edilmiştir:

- Hasarsız durumdaki numuneler sarsma masasına sabitlendikten sonra modellerin üzerine hassas ivmeölçerler yerleştirilmiş (ivmeölçer yerleri ve sayısı gibi detaylar Bölüm 2.5.4’de sunulmuştur) ve dinamik karakteristikler titreşim testleri ile elde edilmiştir.
- Hasarsız durumdaki deney numuneleri üzerine detayları Bölüm 2.4.1’de verilen ilave kat kütleleri yerleştirilerek yüklü durumdaki dinamik karakteristikler titreşim testleri ile elde edilmiştir.
- Sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen her bir deprem testi sonrasında hasarlı durumdaki numuneler üzerinde gözlemsel değerlendirmeye dayalı ön hasar tespitleri yapılmıştır.
- Ön hasar tespitlerinden sonra yapı üzerinde hasarsız durumda dikkate alınan aynı ölçüm noktaları ve ölçüm parametreleri kullanılarak titreşim testleri tekrarlanmış ve her bir sarsma masası deneyi sonrasında dinamik karakteristikler tekrar elde edilmiş ve hasarsız durum verileri ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

- Sarsma masası deneyleri sonrasında ilave kat kütleleri numune üzerinden alınarak hasarlı yapının yüksüz durumdaki dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, kat seviyelerinde elde edilen ivme değerleri, kat ivme büyütme faktörleri, çarpışmanın kat ivmelerine olan etkileri, görelî yer değiştirmelerdeki değişimler, deneysel kuvvet-deplasman ilişkileri bu bölümde tartişılmıştır. Ayrıca ÇTY ile her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında titreşim testleri ile elde edilen dinamik karakteristikler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Dinamik karakteristiklere bağlı olarak hesaplanan hasar indeksleri de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerinin yapısal davranışa ve dinamik karakteristiklere olan etkileri ayrıntılı bir biçimde incelenmeye çalışılmıştır.

3.2. Kat İvmeleri

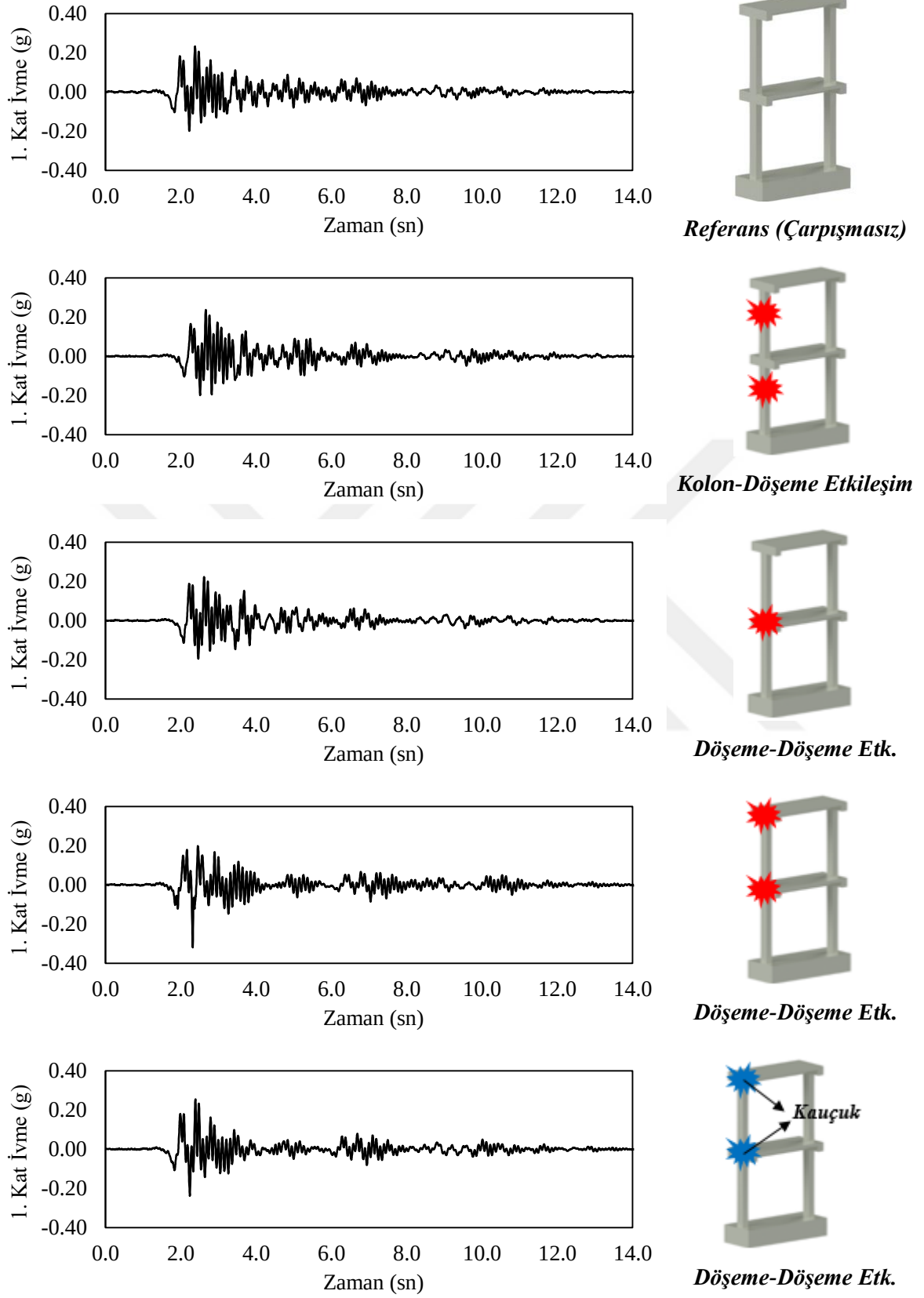
Komşu binaların çarpışması sırasında hızda meydana gelen ani değişiklikler, ivme değerlerinde kısa süreli ve yüksek genlikte pikler oluşmasına neden olmaktadır. Çarpışmanın gerçekteştiği seviyede yer değiştirmenin ani bir şekilde durması, ters yönde büyük ivme pikleri oluşturmaktadır (Raheem, 2014). Bu pikler oldukça kısa süreli olması nedeniyle deneyler sırasında oluşan değişimlerin yakalanması oldukça önemlidir. Çarpışma deneyleri esnasında ani ivme değişikliklerini ve çarpışma sırasında ivmelerdeki pikleri yakalayabilmek için 4.00kHz'e kadar ayarlanabilir örnekleme hızına sahip ve $\pm 40.00g$ ölçüm kapasiteli 3 eksenli 3 adet kablosuz ivmeölçer kat seviyelerinde kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler ile her bir deprem düzeyi için katlarda elde edilen ivmelerin zamanla değişimi şekil 3.1-3.10'da verilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı referans deney ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilen ivme-zaman grafikleri kıyaslandığında, çarpışma etkilerinin kısa süreli yüksek genlikli darbe tepkilerine neden olduğu görölmektedir. Özellikle uygulanan yer hareketi büyüklüğünün artmasıyla birlikte bu etki daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Deneyler sonucunda kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri %25 Erzincan depremi için 0.23g-0.28g, %50 Erzincan depremi için 0.31g-0.38g, %75 Erzincan depremi için 0.49g-0.71g, %100 Erzincan depremi için 0.53g-0.88g ve %100 Parkfield depremi için 0.73g-0.85g olarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi)

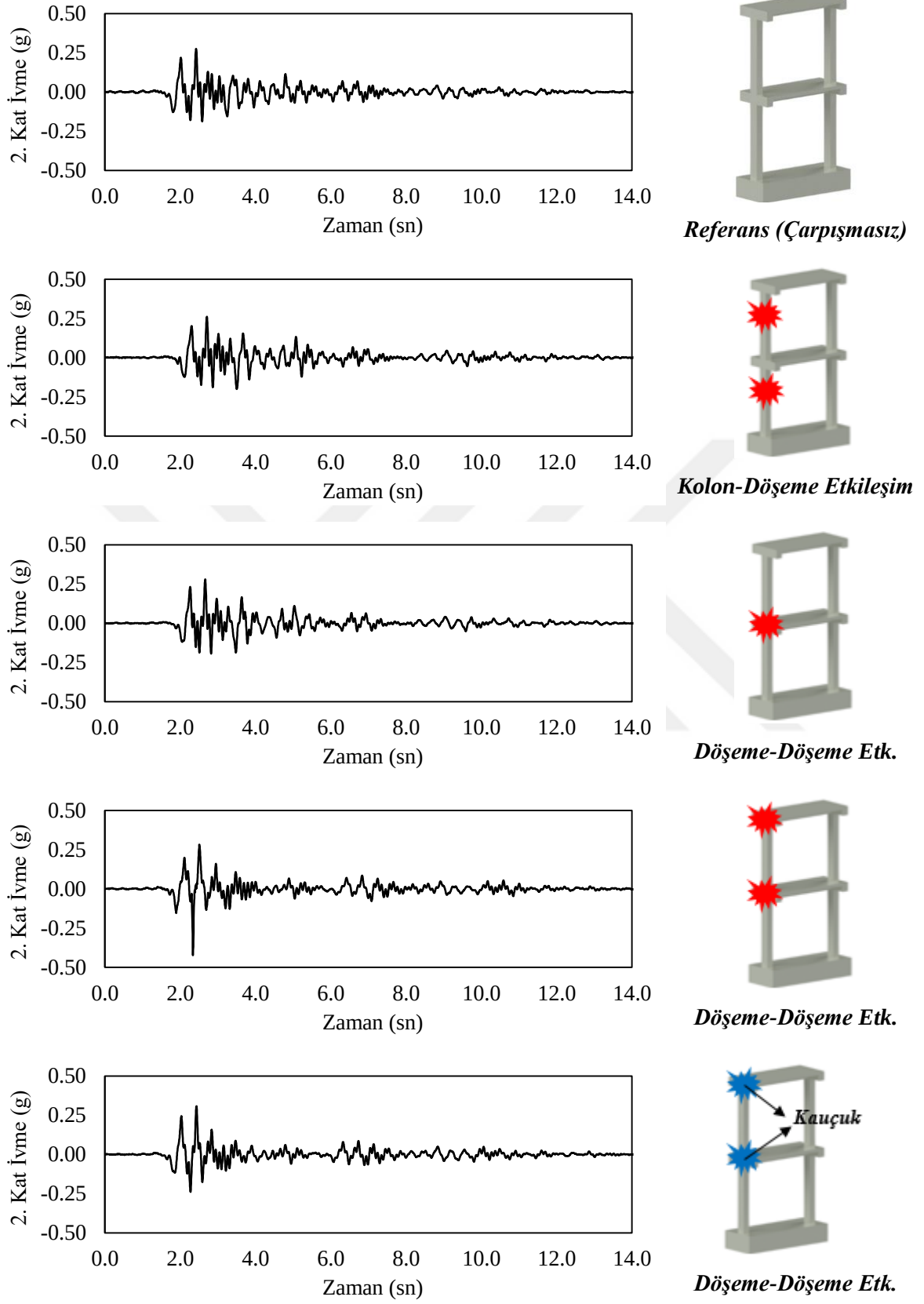
incelendiği deneylerde 1. ve 2. kat seviyeleri için bu ivme değerleri sırasıyla 0.24g-0.26g, 0.39g-0.60g, 0.69g-0.99g, 0.88g-1.80g ve 1.05g-2.00g'dir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'de 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri %25 Erzincan depremi için 0.22g-0.28g, %50 Erzincan depremi için 0.40g-0.45g, %75 Erzincan depremi için 1.21g-0.80g, %100 Erzincan depremi için 2.36g-1.16g ve %100 Parkfield depremi için 1.59g-1.17g olarak elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3'te 1. kat ivme değerleri 0.32g ve 1.89g arasında elde edilirken 2. kat seviyesinde bu değerler 0.42g ve 2.74g arasında olduğu belirlenmiştir. Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri %25 Erzincan depremi için 0.25g-0.31g, %50 Erzincan depremi için 0.48g-0.70g, %75 Erzincan depremi için 0.81g-1.36g, %100 Erzincan depremi için 1.21g-2.43g ve %100 Parkfield depremi için 1.33g-3.23g olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.1. Kat seviyelerinde elde edilen en büyük ivme değerleri

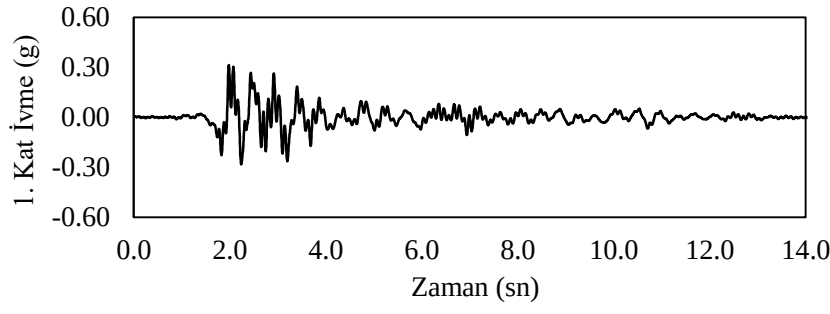
Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
1. Kat Seviyesi En Büyük İvme Değerleri (g)					
Referans	0.233	0.313	0.487	0.527	0.729
Deney-1	0.237	0.392	0.695	0.880	1.047
Deney-2	0.222	0.396	1.212	2.356	1.590
Deney-3	0.319	0.540	1.033	1.890	1.756
Deney-4	0.254	0.476	0.808	1.213	1.329
2. Kat Seviyesi En Büyük İvme Değerleri (g)					
Referans	0.276	0.378	0.708	0.879	0.850
Deney-1	0.260	0.599	0.987	1.804	2.002
Deney-2	0.280	0.454	0.800	1.161	1.171
Deney-3	0.424	0.932	1.747	2.395	2.735
Deney-4	0.308	0.702	1.359	2.426	3.233



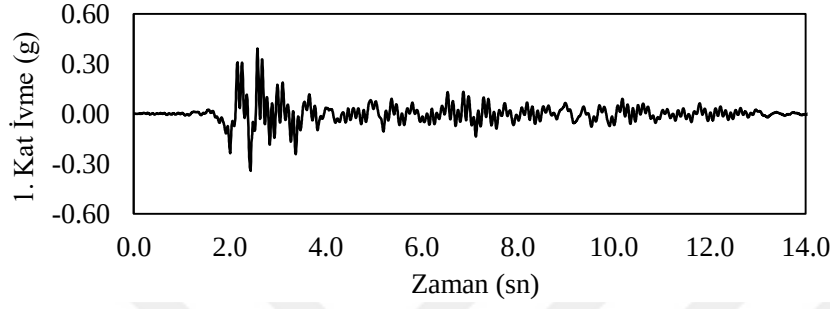
Şekil 3.1. %25 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri



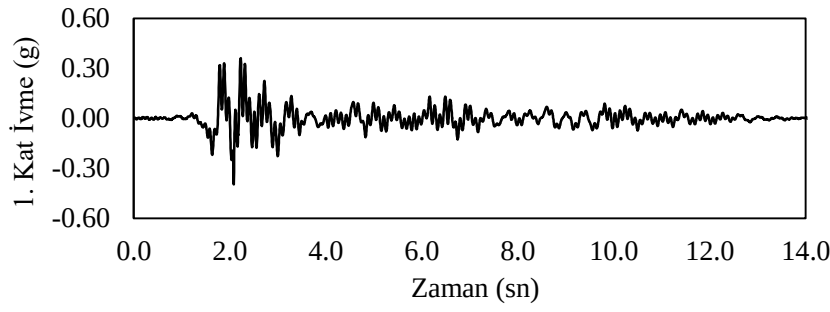
Şekil 3.2. %25 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri



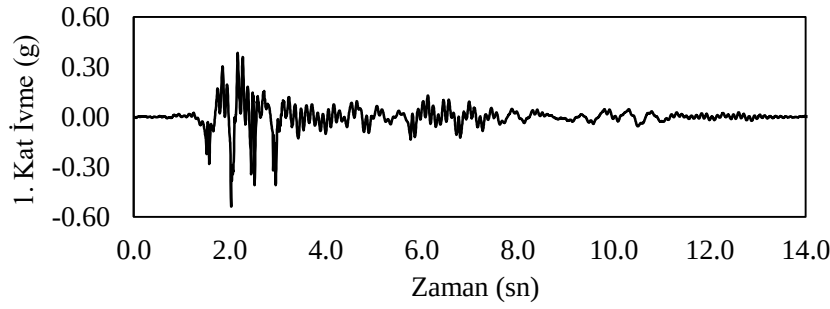
Referans (Çarpışmasız)



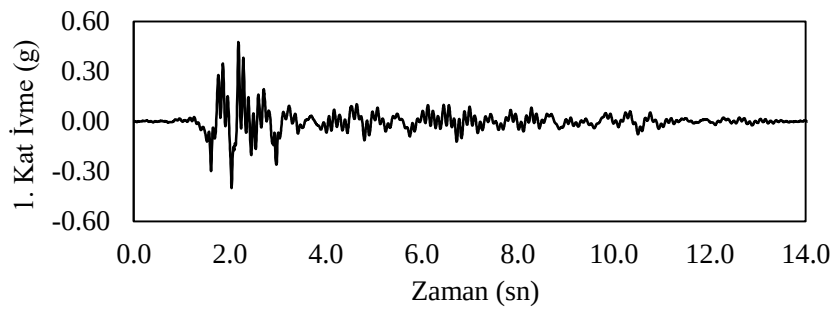
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

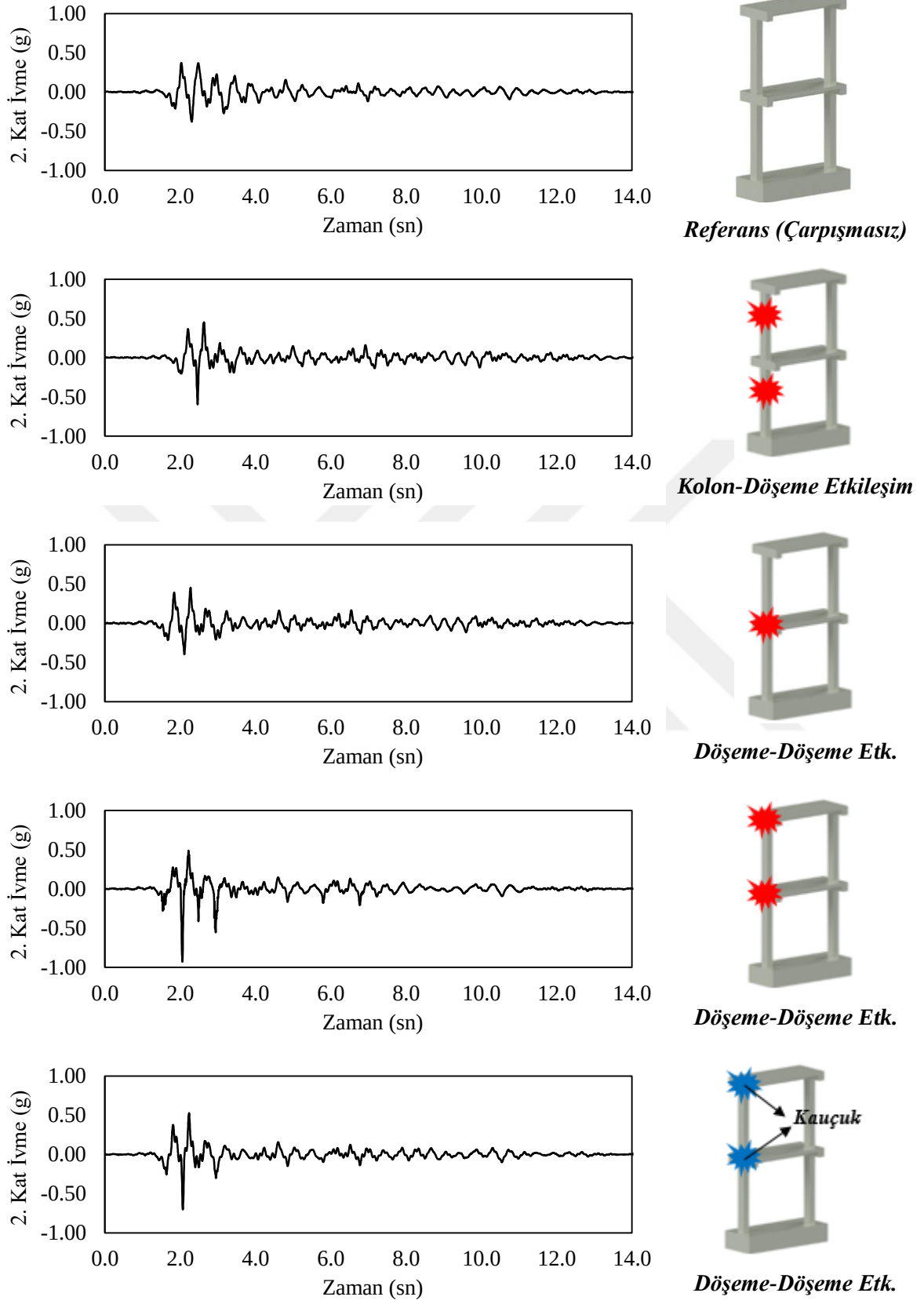


Döşeme-Döşeme Etk.

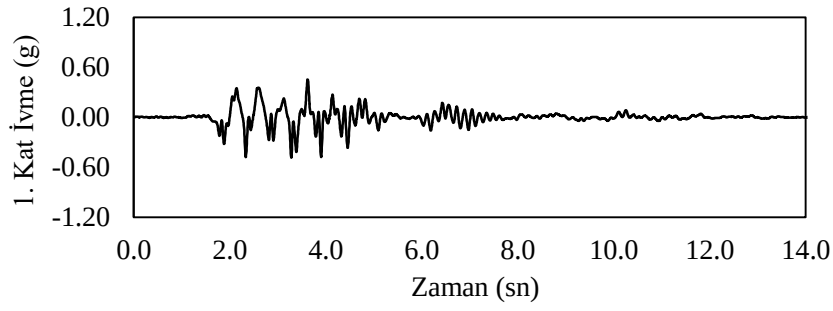


Döşeme-Döşeme Etk.

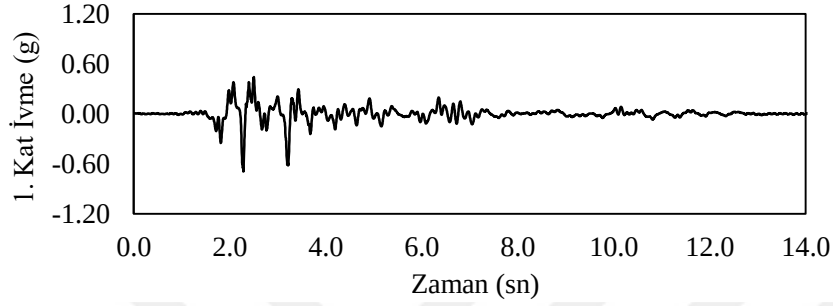
Şekil 3.3. %50 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri



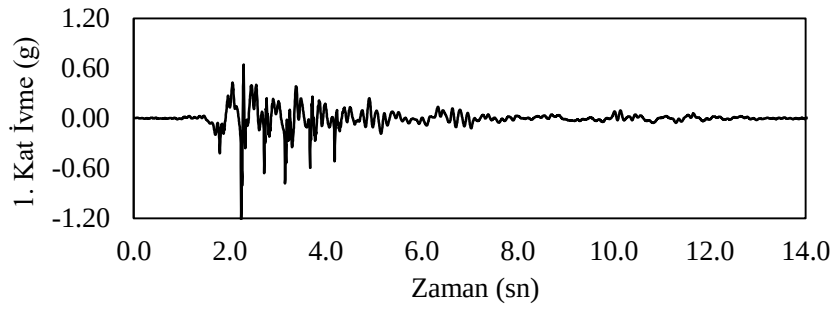
Şekil 3.4. %50 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri



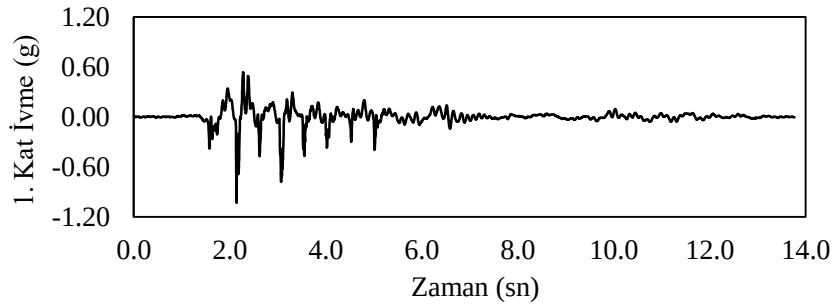
Referans (Çarpışmasız)



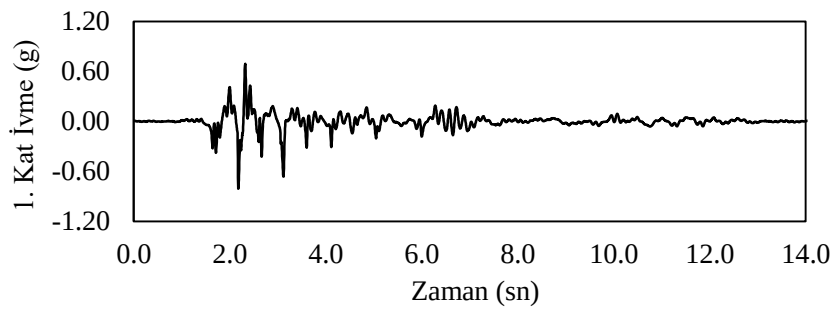
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

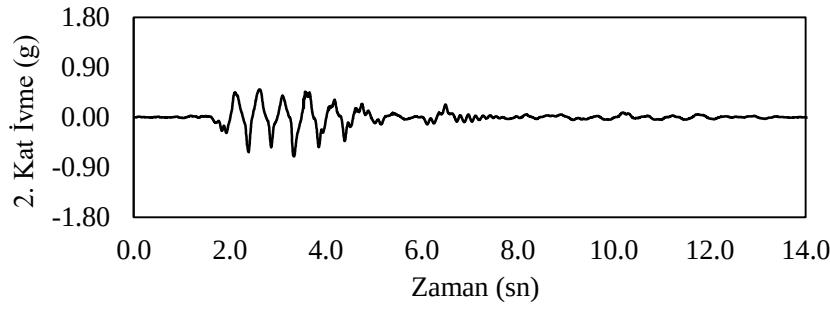


Döşeme-Döşeme Etk.

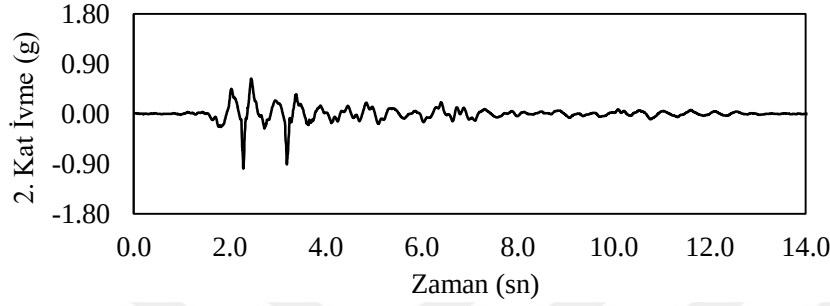


Döşeme-Döşeme Etk.

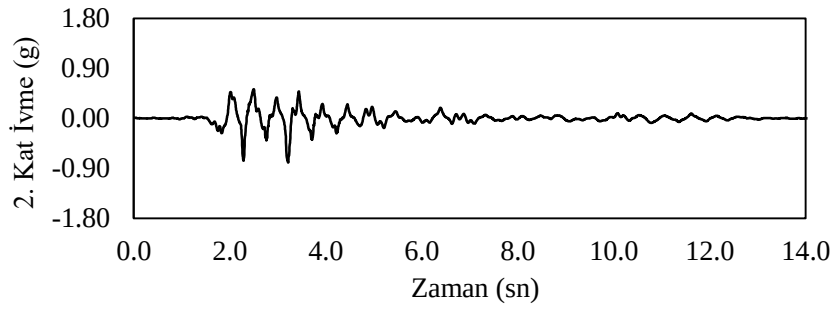
Şekil 3.5. %75 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri



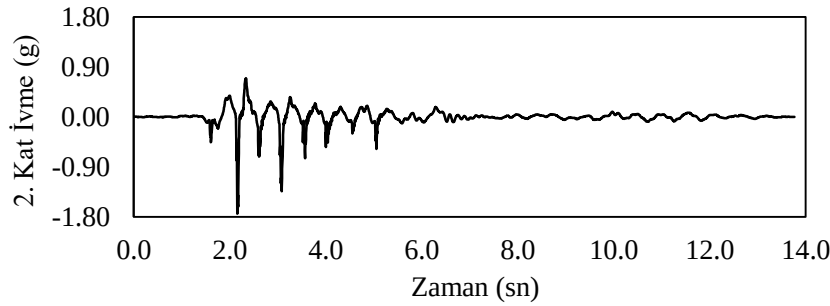
Referans (Çarpışmasız)



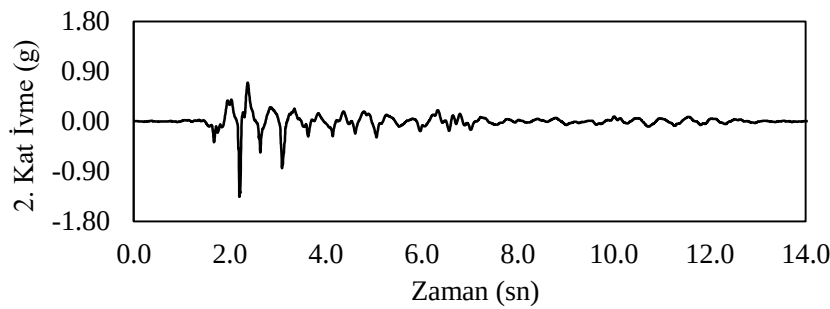
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

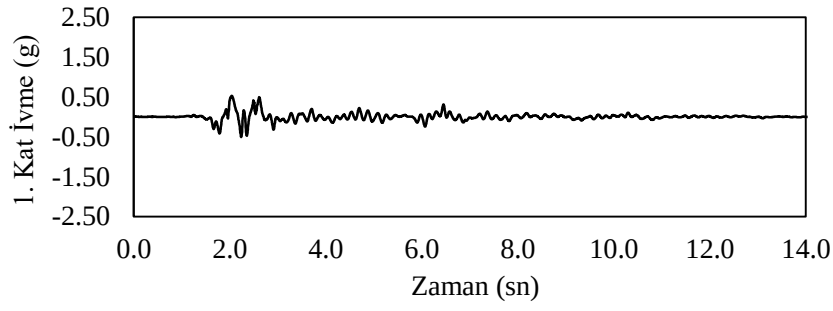


Döşeme-Döşeme Etk.

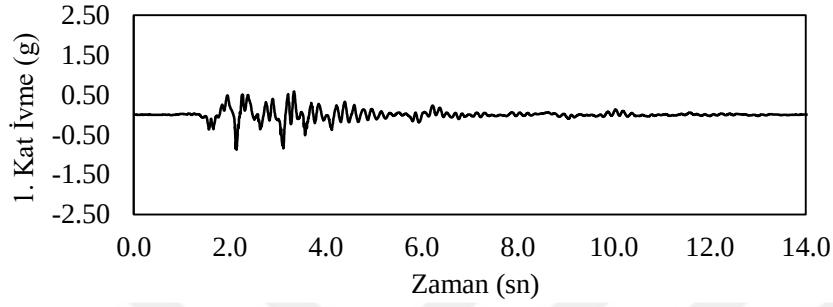


Döşeme-Döşeme Etk.

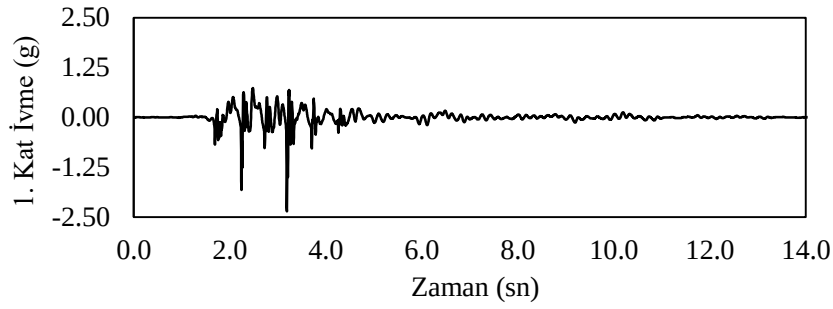
Şekil 3.6. %75 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri



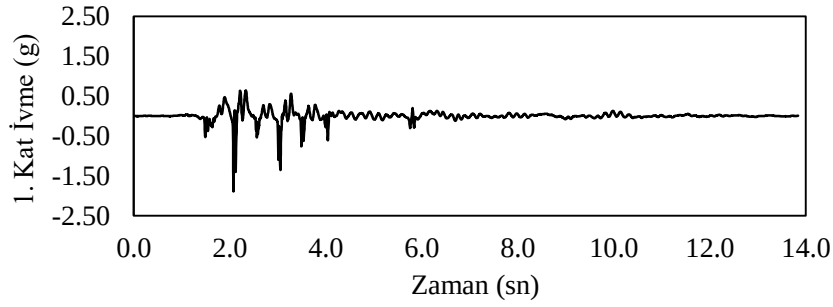
Referans (Çarpışmasız)



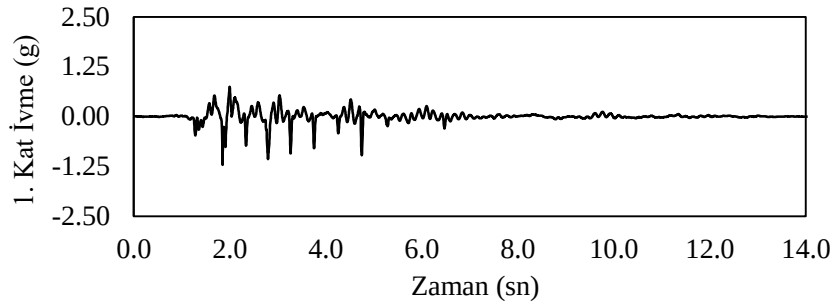
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

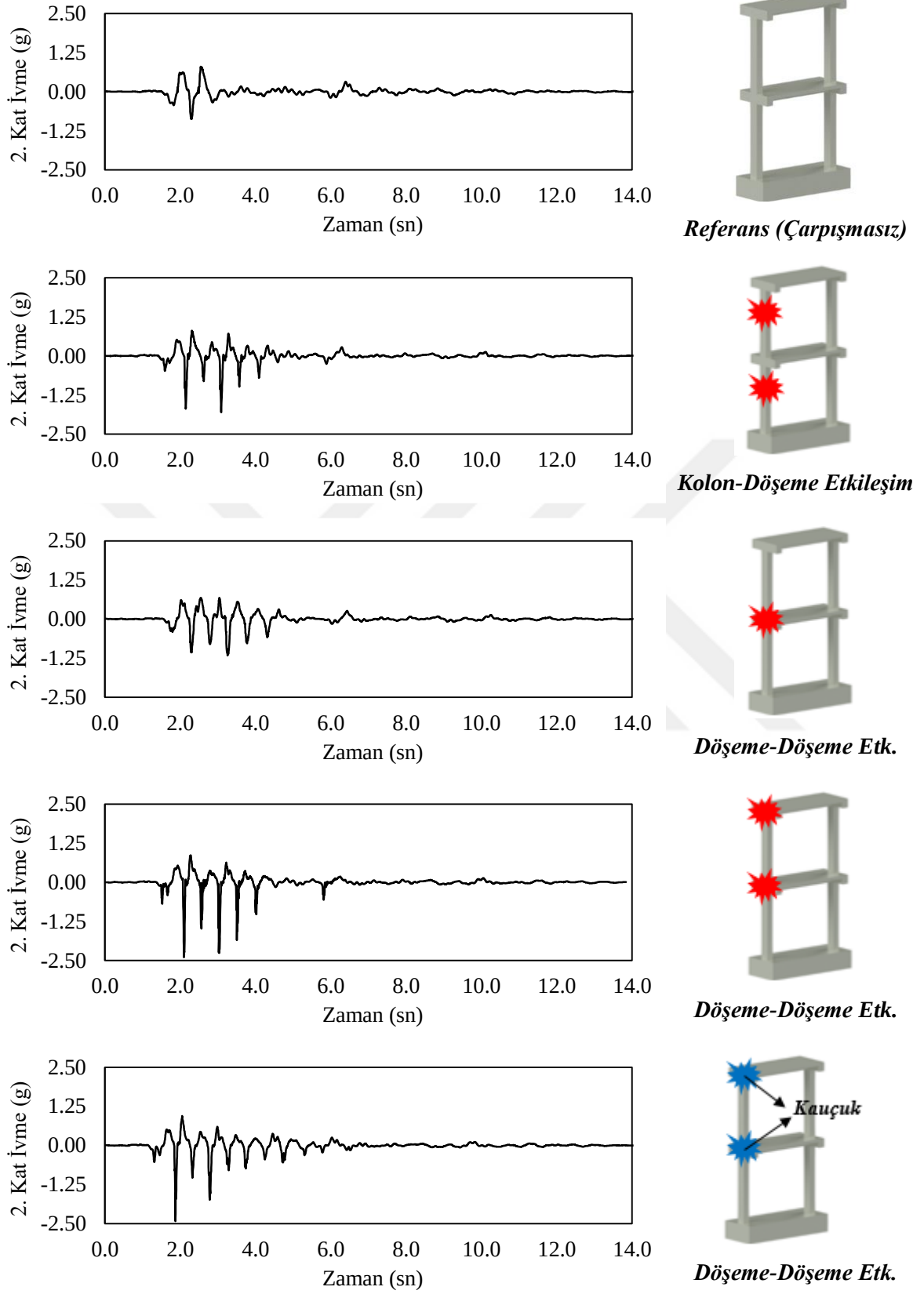


Döşeme-Döşeme Etk.

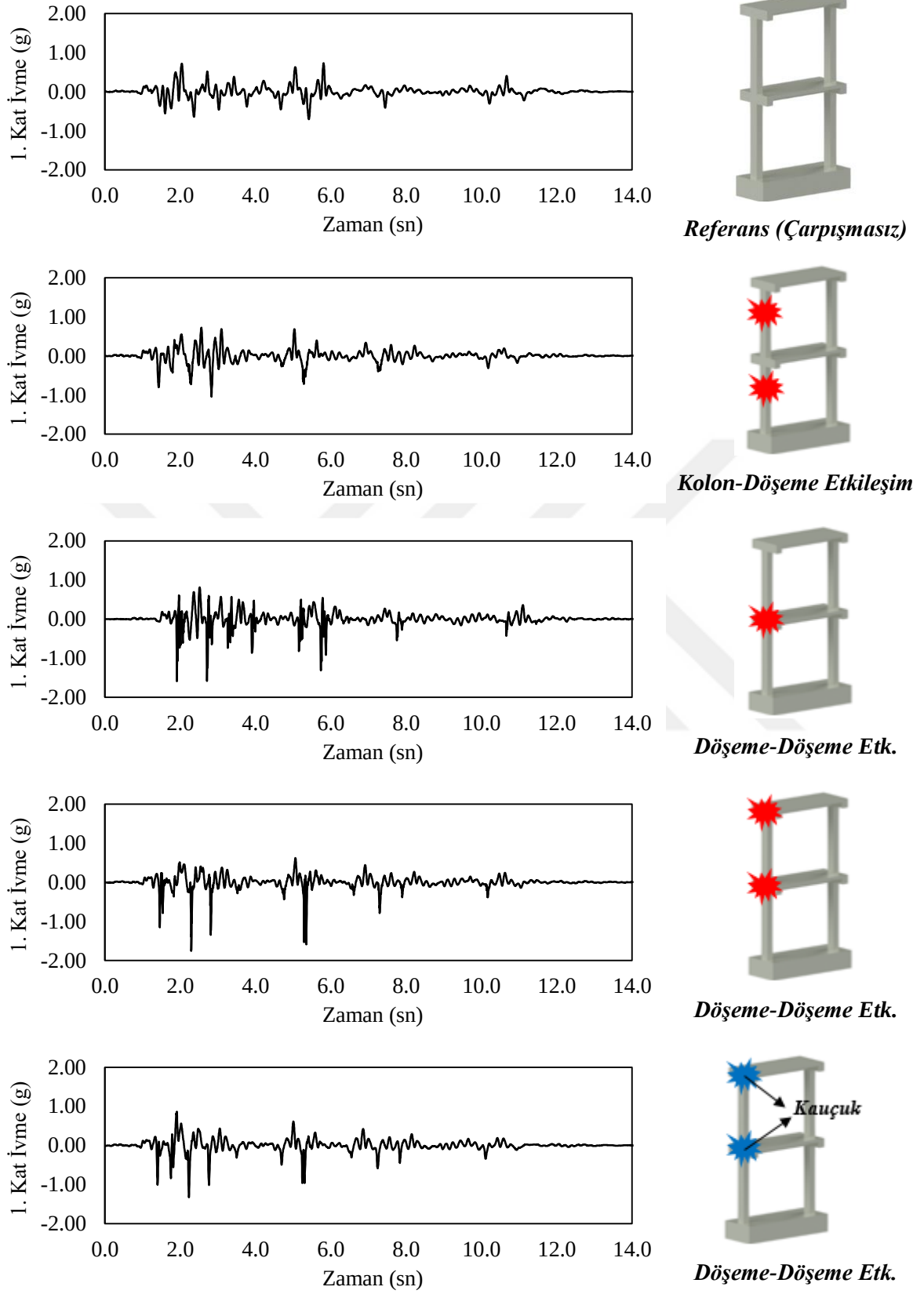


Döşeme-Döşeme Etk.

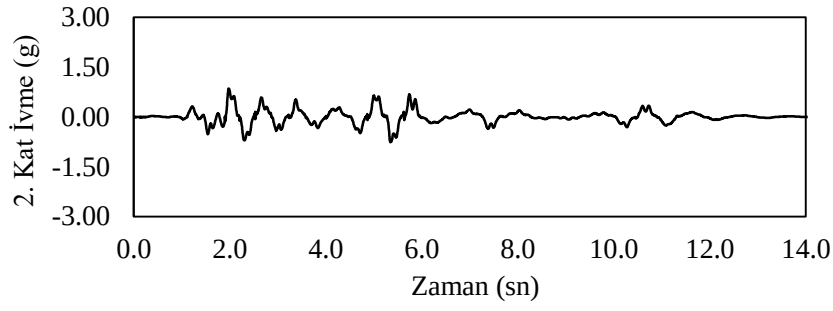
Şekil 3.7. %100 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri



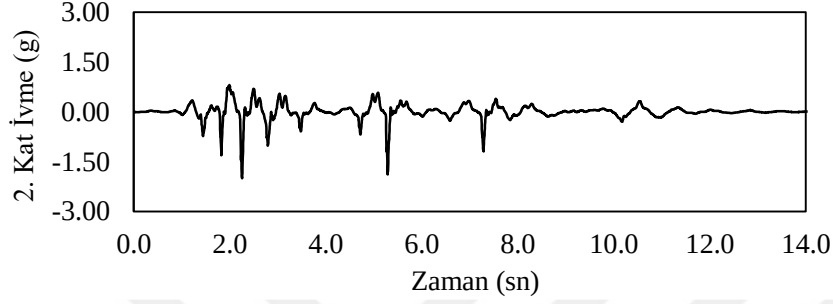
Şekil 3.8. %100 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri



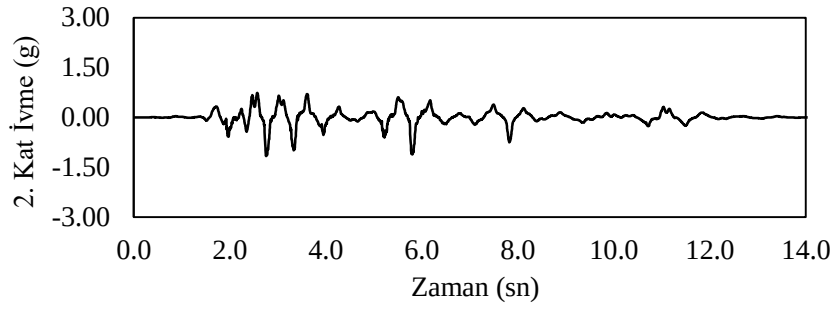
Şekil 3.9. %100 Parkfield depreminde 1. katta elde edilen ivme grafikleri



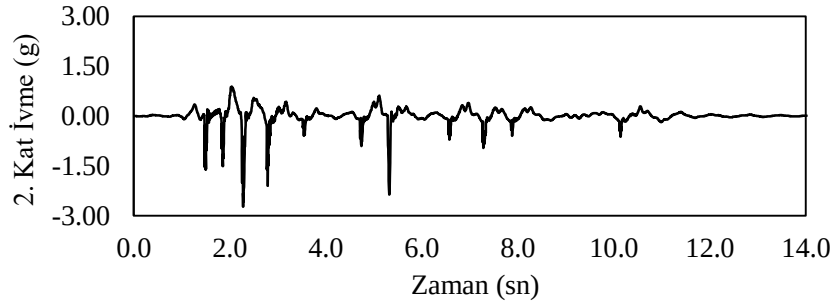
Referans (Çarpışmasız)



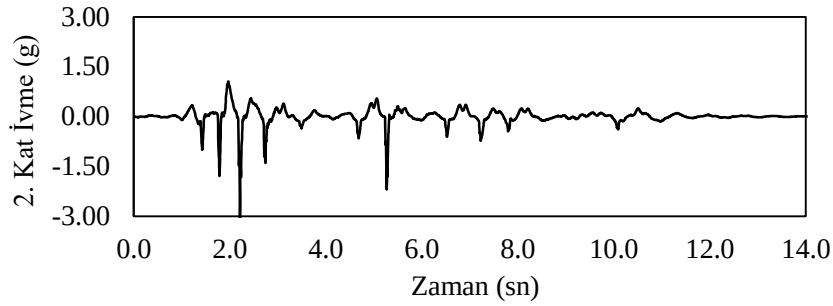
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.



Döşeme-Döşeme Etk.



Döşeme-Döşeme Etk.

Şekil 3.10. %100 Parkfield depreminde 2. katta elde edilen ivme grafikleri

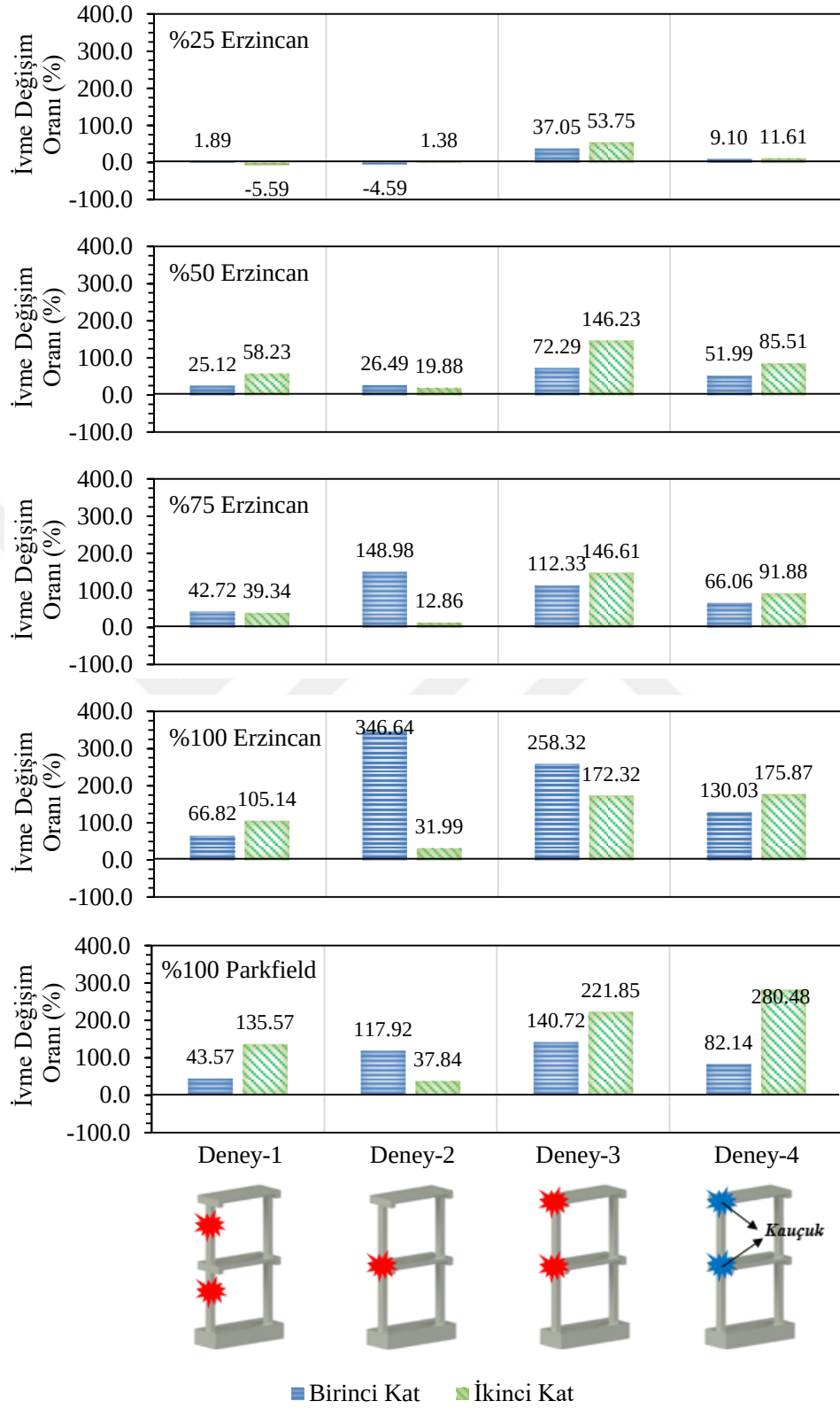
Sarsma masası deneyleri sırasında kat seviyelerinde elde edilen ivmelerde çarpışma nedeniyle oluşan değişimler Şekil 3.11 ile sunulmuştur. Bu yüzdesel değişimler çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney sonuçları ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney 1-4 sonuçları kıyaslanarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde %25 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük ivme değerleri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %1.89 artarken, 2. kat seviyesinde %5.59 azalmıştır. Bu deneyde 1. ve 2. kat seviyelerindeki en büyük ivme değerlerinde artışlar %50 Erzincan depremi için %25.12-%58.23, %75 Erzincan depremi için %42.72-%39.34, %100 Erzincan depremi için %66.82-%105.14 ve %100 Parkfield depremi için %43.57-%135.57 olarak elde edilmiştir. Ayrıca 1. ve 2. kat ivme değerlerinde elde edilen artışlar kıyaslandığında çarpışma etkileri nedeniyle 2. kat seviyesindeki artışların çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bu çarpışma türünde etkileşimin döşeme ve kolon arasında gerçekleşmesi sebebiyle yıkıcı etkileri diğer çarpışma türlerinden daha fazladır. Etkileşim sırasında oluşan çarpışma kuvvetlerinin büyüklüklerine bağlı olarak artan kesme kuvvetleri nedeniyle kolonlarda ciddi hasarların meydana geldiği ve kolonların tamamen işlevsiz kalabildiği geçmiş yıllarda meydana gelen depremlerde de tespit edilmiştir (Çetinkaya, 2011). Bu durum daha sonraki bölümlerde tartışılan sarsma masası deneyleri sonucunda elde edilen hasar dağılımlarında da belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de %25 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük ivme değerleri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %4.59 azalırken, 2. kat seviyesinde %1.38 artmıştır. Bu deneyde 1. ve 2. kat seviyelerindeki en büyük ivme değerlerinde artışlar %50 Erzincan depremi için %26.49-%19.88, %75 Erzincan depremi için %148.98-%12.86, %100 Erzincan depremi için %346.64-%31.99 ve %100 Parkfield depremi için %117.92-%37.84 olarak elde edilmiştir. Çarpışmanın tek bir katta gerçekleşmesi sebebiyle 1. kat tepkilerinin 2. kat seviyesine kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle yer hareketi büyüklüğünün artmasıyla bu durum daha belirgin olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çarpışma türünde alt katta meydana gelen etkileşim daha fazla yer değiştirme yapacak üst katları engellemektedir. Dolayısıyla çarpışma sırasında alt katlarda ortaya çıkan büyük çarpışma kuvvetleri hem çarpışma bölgesinde hem de çarpışma bölgesi üstündeki katlarda ciddi bölgesel hasarlara neden olabilmektedir (Çetinkaya, 2011).

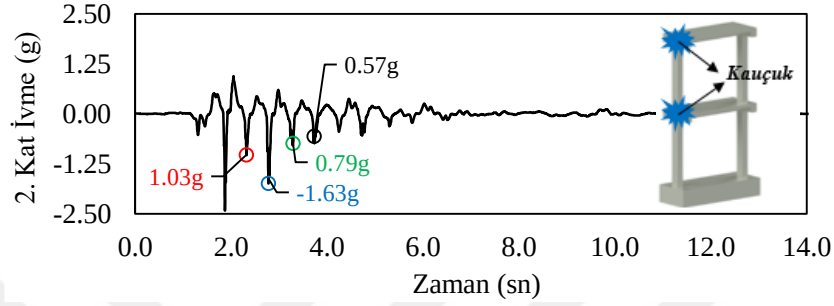
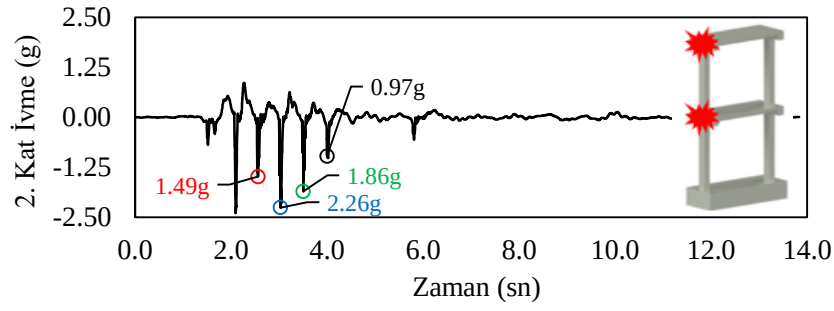
Bu durum daha sonraki bölümlerde tartışılan hasar dağılımlarında da belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3'te Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük ivme değerlerindeki artışlar %25 Erzincan depremi için %37.05-%53.75, %50 Erzincan depremi için %72.29-%146.23, %75 Erzincan depremi için %112.33-%146.61, %100 Erzincan depremi için %258.32-%172.32 ve %100 Parkfield depremi için %140.72-%221.85 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.11'den de görüleceği üzere dikkate alınan deprem düzeylerinin çoğunda bu çarpışma türü diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyük yapısal tepkilere neden olmaktadır.

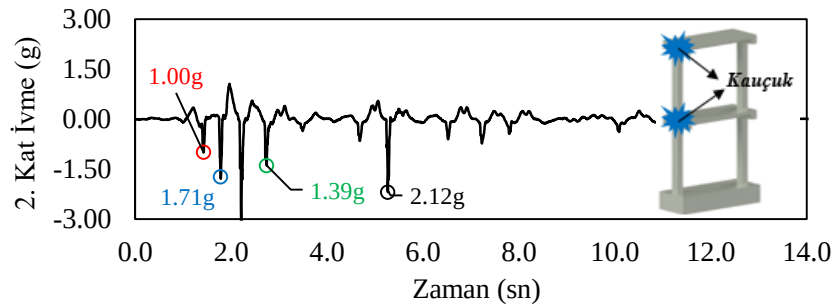
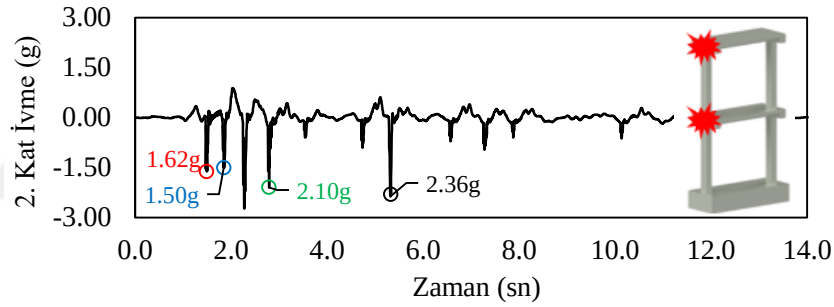
Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için numune ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük ivme değerlerindeki artışlar %25 Erzincan depremi için %9.10-%11.61, %50 Erzincan depremi için %51.99-%85.51, %75 Erzincan depremi için %66.06-%91.88, %100 Erzincan depremi için %130.03-%175.87 ve %100 Parkfield depremi için %82.14-%280.48 olarak elde edilmiştir. Çarpışma etkilerinin azaltılması amacıyla çarpışma bölgelerine kauçuk levhaların yerleştirildiği bu deneylerde de Deney-3'e benzer şekilde her iki katta döşeme-döşeme çarpışması dikkate alınmıştır. Dolayısıyla Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen kat ivme değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, özellikle düşük yoğunluğa sahip yer hareketlerinde (%25, %50 ve %75 Erzincan depremleri) kauçuk levhaların her iki kat düzeyindeki ivme değerlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Benzer şekilde %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremleri ile gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde 1. kat seviyesinde elde edilen ivme değerleri kullanılan kauçuk levha ile önemli ölçüde azaltılmıştır. Ancak bu depremlerde 2. kat seviyesinde elde edilen en büyük ivme değerlerinde bazı artışlar gözlenmiştir (Şekil 3.11). %100 Erzincan ve %100 Parfield depremlerinde 2. kat seviyesinde elde edilen ivme-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde deney numunelerinin sarsma masası deneyleri sırasında birçok kez çarpıştığını ve kauçuk levhaların bu çarpışmalar sırasında oluşan diğer pikleri sönmülediği görülebilmektedir. Bu durumu daha açıklayıcı bir biçimde ortaya koymak için %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremleri ile gerçekleştirilen deneyler sırasında Deney-3 ve Deney-4'te 2. kat seviyesinde elde edilen ivme-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.12 ile sunulmuştur.



Şekil 3.11. Çarpışmanın kat ivmeleri üzerindeki etkisi



a. %100 Erzincan depremi



b. %100 Parkfield depremi

Şekil 3.12. %100 Erzincan ve Parkfield depremleri ile gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri sırasında Deney-3 ve Deney-4'te 2. kat seviyesinde elde edilen ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması

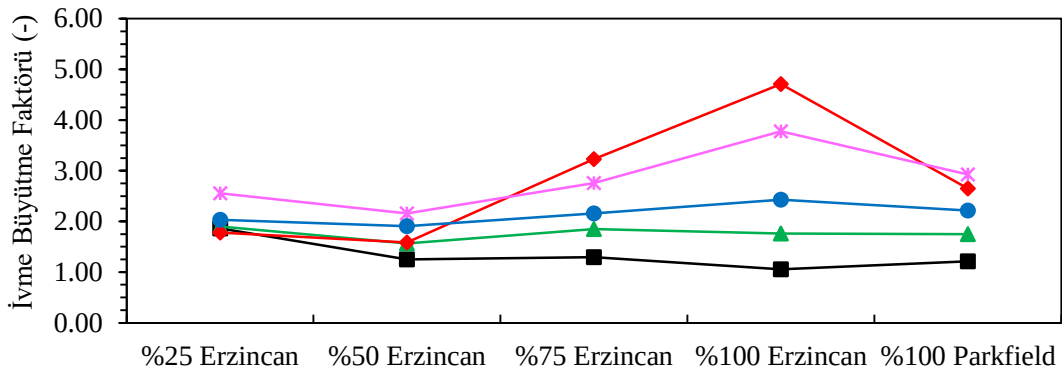
Gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri sonrasında her kat için ivme büyütme faktörleri hesaplanmış ve yer hareketi büyüklüğüne bağlı olarak kat seviyelerindeki değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.13'te verilmiştir. İvme büyütme faktörü; ilgili katta

kaydedilen en büyük ivme değerin, sarsma masasında uygulanan yer hareketine ait en büyük ivme değeri oranı olarak tanımlanmaktadır. İvme büyütme faktörlerinin dağılımı ise Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Şekil 3.14'ten görüleceği üzere büyütme faktörü yükseklikle beraber genellikle artma eğilimindedir. Bu durum farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'nin tüm testleri için geçerli değildir. Çarpışmanın 1. kat seviyesinde gerçekleşmesi bu deney sırasında bu katta kaydedilen ivme değerini önemli ölçüde artırmaktadır.

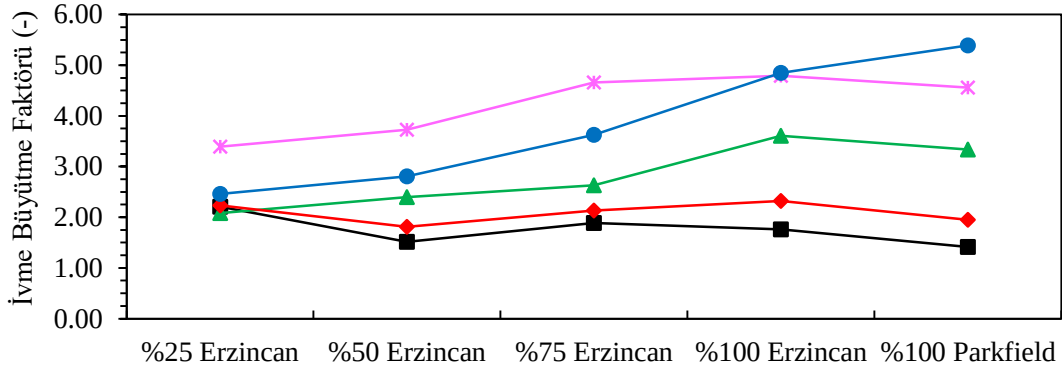
Çarpışmanın dikkate alınmadığı Referans deneyde yer hareketinin büyüklüğü arttıkça ivme büyütme faktörünün kademeli olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 3.14). Bunun nedeni, yer hareketi büyüklüğü arttıkça yapısal hasarın artarak ilerlemesine ve rijitlik azalmasına bağlı olarak titreşim periyodunun uzaması ve bunun sonucunda büyütme faktörünün azalmasıdır. Bu durum geçmiş yıllarda sarsma masası ile gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları ile uyumludur (Li vd., 2021; Zhao vd., 2022). Ancak bu durum çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deney numunelerinde gözlenmemiştir. Çarpışmanın dikkate alındığı deney numunelerinde uygulanan yer hareketinin büyüklüğünün artması her iki kat düzeyinde de kaydedilen ivme değerlerinde artışlara neden olmuştur. Bunun nedeni, komşu binaların çarpışması sırasında hızda meydana gelen ani değişikliklerin, ivme değerlerinde kısa süreli ve yüksek genlikte piklerin oluşmasına neden olmasıdır.

Kat ivmeleri, yapısal ve yapısal olmayan elemanlara uygulanan sismik kuvvetlerin önemli bir göstergesidir. Geçmiş yıllarda gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde araştırmacılar, katlardaki ivmeölçerlerden elde edilen ivme değerlerini kat ve taban kesme kuvvetleri ile ilişkilendirmiştir (Ahmad vd., 2019; Khan vd., 2021; Miglietta vd., 2021). Komşu binalar arasındaki çarpışmadan kaynaklı ivme değerlerinde gözlemlenen bu artışlar kat ve taban kesme kuvvetlerinde önemli artışlara neden olmaktadır. Bu ise çarpışma etkilerinin tasarım sırasında dikkate alınmaması durumunda olası depremlerde beklenenden çok daha büyük yapısal tepkilerin meydana gelebileceğini ve yapısal elemanlarda beklenmedik hasarların oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde depremler sonrası yapılan araştırmalar, yapılarda oluşan bölgesel hasarların genellikle binalar arasındaki yetersiz derz boşluğunun neden olduğu çarpışmalardan kaynaklandığını, bu çarpışmaların yapılarda toptan göçmeye neden olabileceğini ve çarpışma etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur (Rosenblueth ve Meli, 1986; Kasai ve Maison, 1991; Raheem vd., 2019).

Hasar ve göçme mekanizmalarına bağlı olarak, binalardaki yapısal olmayan elemanlar yer değiştirmeye duyarlı ve ivmeye duyarlı olarak sınıflandırılabilir (Lin ve Mahin, 1985; Flores vd., 2015). İvmeye duyarlı yapısal olmayan elemanlara asma tavan sistemleri, yangın sprinkler boruları, aydınlatma armatürleri ve mekanik ekipmanlar örnek olarak verilebilir. Bu bileşenlerdeki deprem kaynaklı hasarlar, yer ivmelerinden daha büyük olabilen kat ivmelerinin neden olduğu atalet kuvvetlerinden kaynaklanır (Wieser vd., 2013). Dolayısıyla ivme tepkilerinde çarpışmadan kaynaklı oluşan ani piklerin varlığı, yapısal olmayan elemanlar ve özellikle hassas ekipmanları barındıran binalar için oldukça kritik olmaktadır.



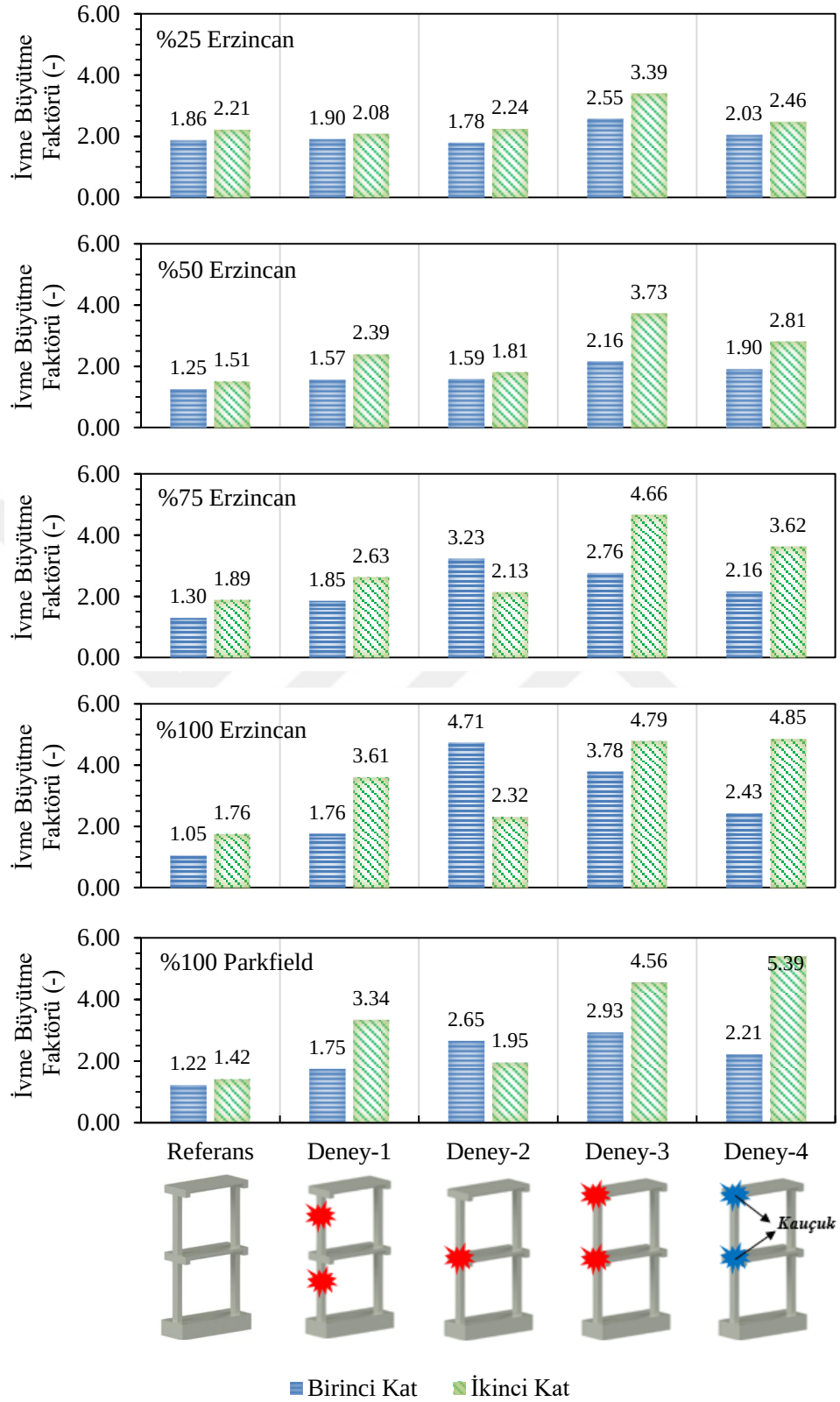
a. 1. Kat seviyesi



b. 2. Kat seviyesi

- Referans Deney
- ▲ Deney-1 (Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması)
- ◆ Deney-2 (Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması)
- * Deney-3 (Aynı yükseliğe sahip binaların çarpışması)
- Deney-4 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması-Kauçuklu)

Şekil 3.13. Yer hareketi büyüklüğüne bağlı olarak ivme büyütme faktörlerinin değişimi



Şekil 3.14. İvme büyütme faktörleri

3.3. Yer Değiştirmeler

Çarpışma deneyleri sırasında betonarme deney numunelerinin temel ve kat seviyelerinde meydana gelen yer değiştirmelerin elde edilmesi ve görelili kat öteleme oranlarının belirlenmesi amacıyla detayları Bölüm 2.5.3'te verilen potansiyometrik cetveller kullanılmıştır. Bu cetveller ile her bir deprem düzeyi için katlarda elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 3.15-3.24'te verilmiştir.

Deneyler sonucunda kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri %25 Erzincan depremi için 3.86mm-6.55mm, %50 Erzincan depremi için 7.62mm-13.22mm, %75 Erzincan depremi için 16.96mm-34.88mm, %100 Erzincan depremi için 33.75mm-63.06mm ve %100 Parkfield depremi için 43.57mm-78.76mm olarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde 1. ve 2. kat seviyeleri için bu yer değiştirme değerleri sırasıyla 2.93mm-4.99mm, 7.24mm-13.54mm, 13.52mm-24.83mm, 20.73mm-39.09mm ve 32.36mm-57.10mm'dir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'de 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri %25 Erzincan depremi için 3.46mm-6.18mm, %50 Erzincan depremi için 7.60mm-13.76mm, %75 Erzincan depremi için 12.53mm-22.82mm, %100 Erzincan depremi için 19.85mm-40.63mm ve %100 Parkfield depremi için 23.29mm-51.54mm olarak elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3'te 1. kat yer değiştirme değerleri 4.57mm ve 35.95mm arasında elde edilirken 2. kat seviyesinde bu değerler 9.48mm ve 72.18mm arasında olduğu belirlenmiştir. Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekteştirilen sarsma masası deneylerinde ise 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri %25 Erzincan depremi için 3.98mm-7.41mm, %50 Erzincan depremi için 8.40mm-16.93mm, %75 Erzincan depremi için 15.40mm-30.64mm, %100 Erzincan depremi için 23.21mm-49.92mm ve Parkfield depremi için 38.71mm-77.85mm olarak elde edilmiştir.

İki bina arasında yetersiz boşluk nedeniyle etkileşim meydana geldiğinde, yapıların yer değiştirme talepleri iki farklı şekilde etkilenir. Çarpışmanın meydana geldiği yönde yer değiştirme tepkilerinde azalma beklenir. Ancak etkileşimin olmadığı serbest yönde aktarılan

enerji nedeniyle ivmelere benzer şekilde daha yüksek yer değiştirme talepleri gözlemlenebilmektedir. Bu durum çarpışmanın büyüklüğünden ve yapısal özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir (Çaycı ve Akpınar, 2021). Bu durumu daha iyi açıklamak amacıyla sarsma masası deneylerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.15-3.24'te sunulmuştur.

Şekil 3.15-3.24'ten görüleceği üzere çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı referans deney ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri kıyaslandığında, çarpışma nedeniyle etkileşimin olduğu pozitif yönde yer değiştirme değerleri genellikle azalmaktadır. Özellikle uygulanan yer hareketinin büyüklüğünün artmasıyla birlikte bu etki daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Etkileşimin olmadığı serbest yönde yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde ise çarpışma etkileri nedeniyle bu yönde de yer değiştirme değerlerinde azalmaların meydana geldiği söylenebilir. Ancak her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3 ve binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen Deney-4 etkileşim olmadığı serbest yönde daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.1-3.10'dan da görüleceği üzere Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen kat ivme değerleri referans deney ve diğer çarpışma türlerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilen ivme değerlerine kıyasla daha büyüktür. Tabatake vd. (2014), çarpışma sırasında elde edilen ivme değerleri ile çarpışma kuvvetlerini hesaplamıştır. Kat ivmeleri ile orantılı olarak artan çarpışma kuvvetlerinin aktarılan enerjiyi artırması, etkileşimin olmadığı serbest yönde daha yüksek yer değiştirme taleplerine neden olmaktadır. Çarpışma nedeniyle yer değiştirme değerlerinde bir takım azalmalar kaydedilse bile oluşan ani ivme pikleri ve yapıların hareketlerinin ani bir şekilde sınırlandırılması taşıyıcı sistem elemanlarında yıkıcı etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle komşu binalar arasındaki çarpışma etkileri çoğu durumda yapısal davranışı olumsuz etkilemektedir (Efraimiadou vd., 2013; Akpınar, 2019).

Sarsma masası deneyleri sırasında kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinde çarpışma nedeniyle oluşan değişimler Şekil 3.25 ile sunulmuştur. Bu yüzdesel değişimler çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney sonuçları ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney 1-4 sonuçları kıyaslanarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde %50 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %4.99 azalırken, 2. kat

seviyesinde %2.42 artmıştır. Bu deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde en büyük yer değiştirme değerlerindeki azalma %25 Erzincan depremi için %24.09-%23.82, %75 Erzincan depremi için %20.28-%28.81, %100 Erzincan depremi için %38.58-%38.01 ve %100 Parkfield depremi için %25.73-%27.50 olarak elde edilmiştir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de %50 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değeri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %0.26 azalırken, 2. kat seviyesinde %4.08 artmıştır. Bu deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde en büyük yer değiştirme değerlerindeki azalma %25 Erzincan depremi için %10.36-%5.65, %75 Erzincan depremi için %26.12-%34.58, %100 Erzincan depremi için %41.19-%35.57 ve %100 Parkfield depremi için %46.55-%34.56 olarak elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3’te Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük yer değiştirme değerlerindeki artışlar %25 Erzincan depremi için %18.39-%44.73, %50 Erzincan depremi için %32.38-52.72 ve %75 Erzincan depremi için %3.89-%1.78’dir. Görüleceği üzere nispeten daha küçük yer hareketleri altında yer değiştirme talebi bu çarpışma türünde artmaktadır. Ancak %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremleri için en büyük yer değiştirme değerleri 1. ve 2. katlarda %22.34-%16.67 ve %17.49-%8.35 azalmıştır. Şekil 3.25’ten görüleceği üzere dikkate alınan deprem düzeylerinin çoğunda bu çarpışma türü diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyük yapısal tepkilere neden olmaktadır.

Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük yer değiştirme değerleri %25 Erzincan depremi için %3.11-%13.13 ve %50 Erzincan depremi için %10.24-%28.06 artmıştır. Referans deneye kıyaslandığında, uygulanan yer hareketinin büyüklüğünün artmasıyla numunenin yer değiştirme talebi azalmıştır. Bu azalmalar %75 Erzincan depremi için %9.20-%12.16, %100 Erzincan depremi için %31.23-%20.84 ve %100 Parkfield depremi için %11.15-%1.16 olarak elde edilmiştir. Çarpışma etkilerinin azaltılması amacıyla çarpışma bölgelerine kauçuk levhaların yerleştirildiği bu deneylerde de Deney-3’e benzer şekilde her iki katta döşeme-döşeme çarpışması dikkate alınmıştır. Dolayısıyla Deney-3 ve Deney-4’te elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, kauçuk levhaların her iki kat düzeyindeki yer değiştirme değerlerini azalttığı görülmektedir. Bu iki deney sonucu kıyaslandığında kauçuk levhalar 1. ve 2. kat seviyesinde en büyük yer değiştirme değerlerini %25 Erzincan depremi için %14.82-%27.94, %50 Erzincan depremi

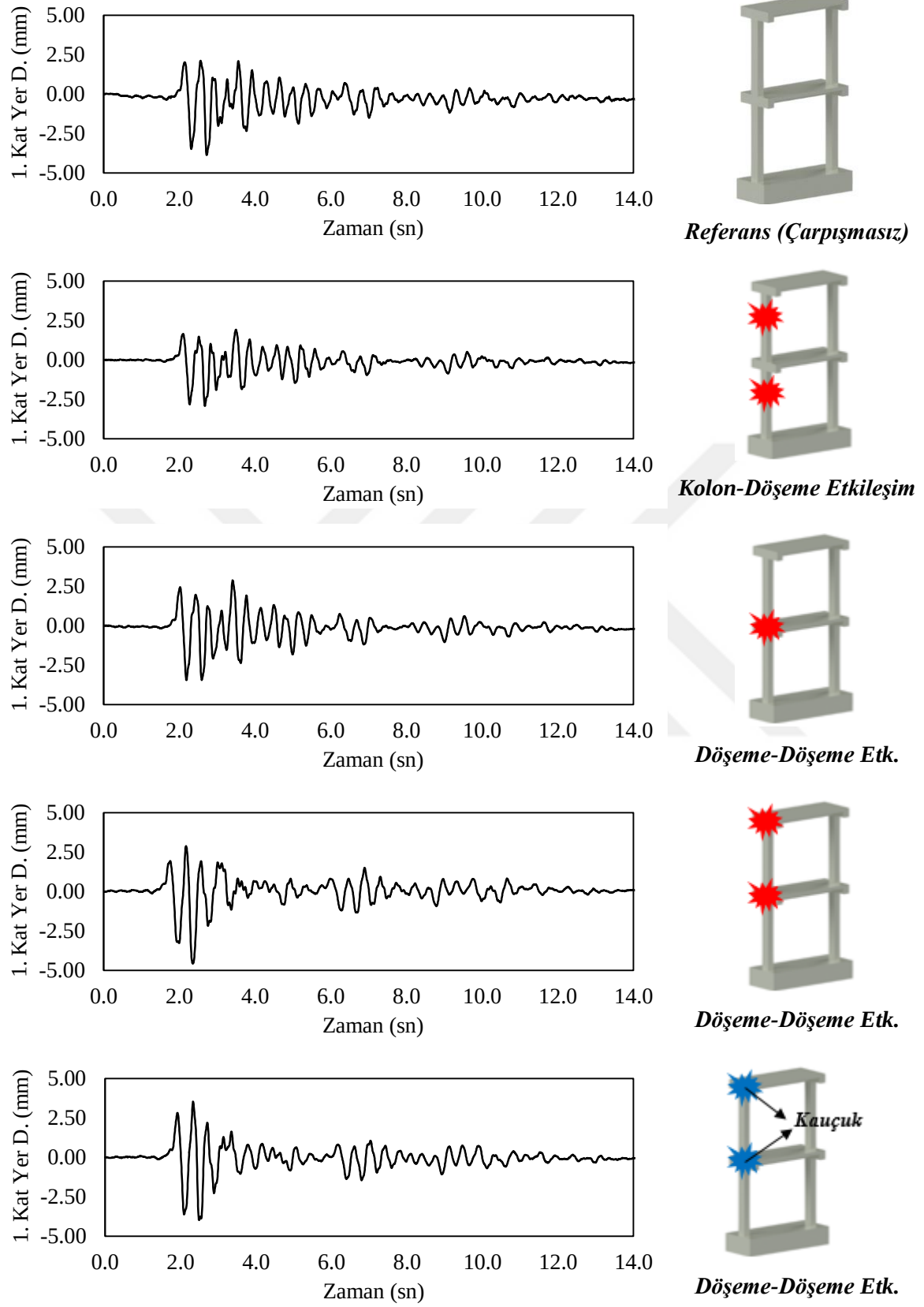
için %20.00-%19.26, %75 Erzincan depremi için %14.42-%15.86 ve %100 Erzincan depremi için %12.93-%5.27 oranında azaltmıştır. Ancak Parkfield depreminde bazı artışlar gözlenmiştir (Şekil 3.25).

Tablo 3.2. 1. Kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri

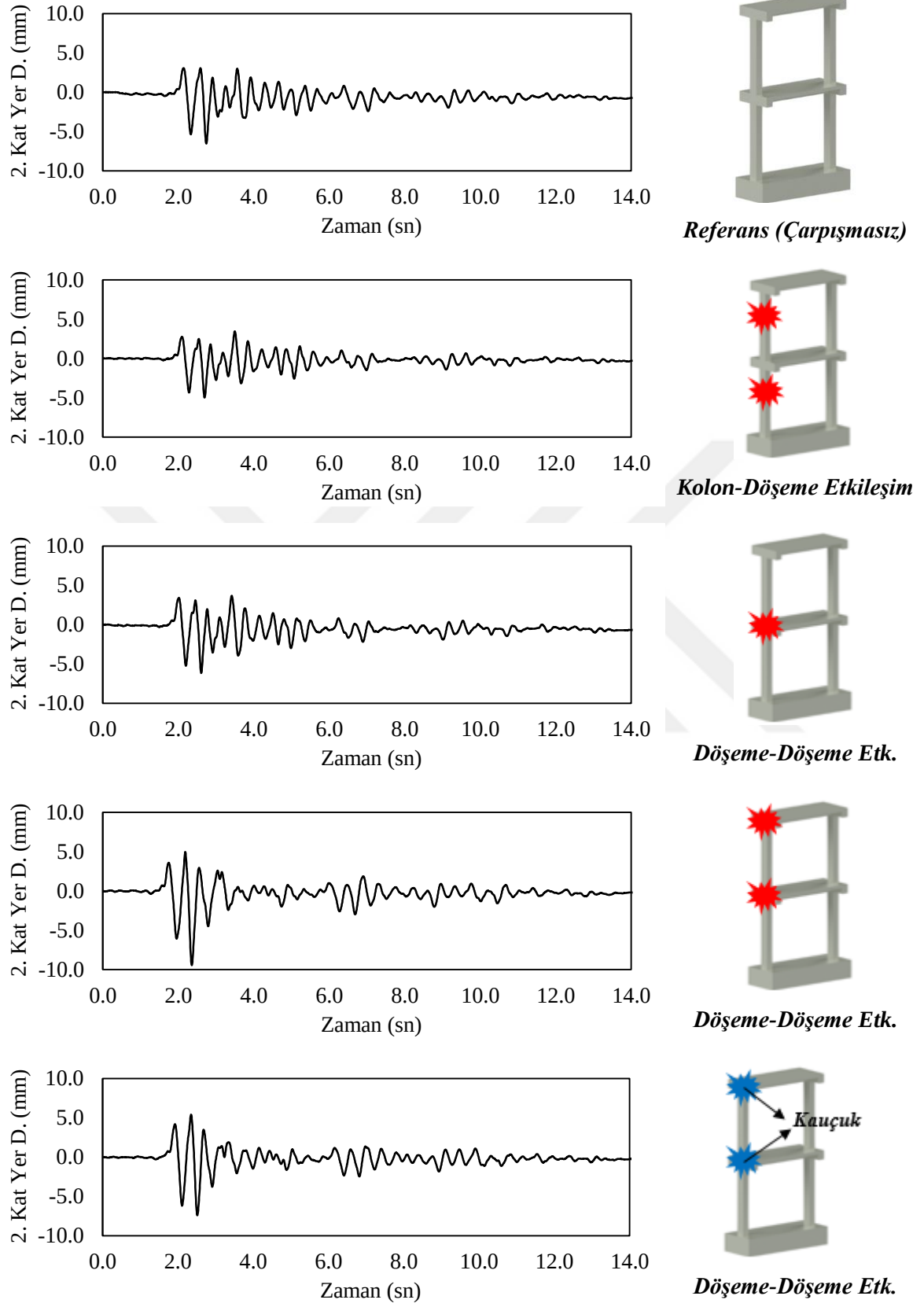
Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
Etkileşimin Olduğu Yöndeki En Büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Referans	2.115	5.296	16.331	17.885	43.566
Deney-1	1.919	3.415	7.412	10.034	11.130
Deney-2	2.875	5.122	6.684	7.840	9.082
Deney-3	2.873	4.305	6.264	8.976	11.879
Deney-4	3.538	4.819	6.886	9.050	10.824
Etkileşimin Olmadığı Serbest Yöndeki En Büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Referans	-3.865	-7.621	-16.964	-33.748	-37.956
Deney-1	-2.929	-7.238	-13.518	-20.725	-32.360
Deney-2	-3.456	-7.603	-12.533	-19.853	-23.293
Deney-3	-4.567	-10.082	-17.622	-26.210	-35.950
Deney-4	-3.982	-8.396	-15.403	-23.212	-38.708

Tablo 3.3. 2. Kat seviyesinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri

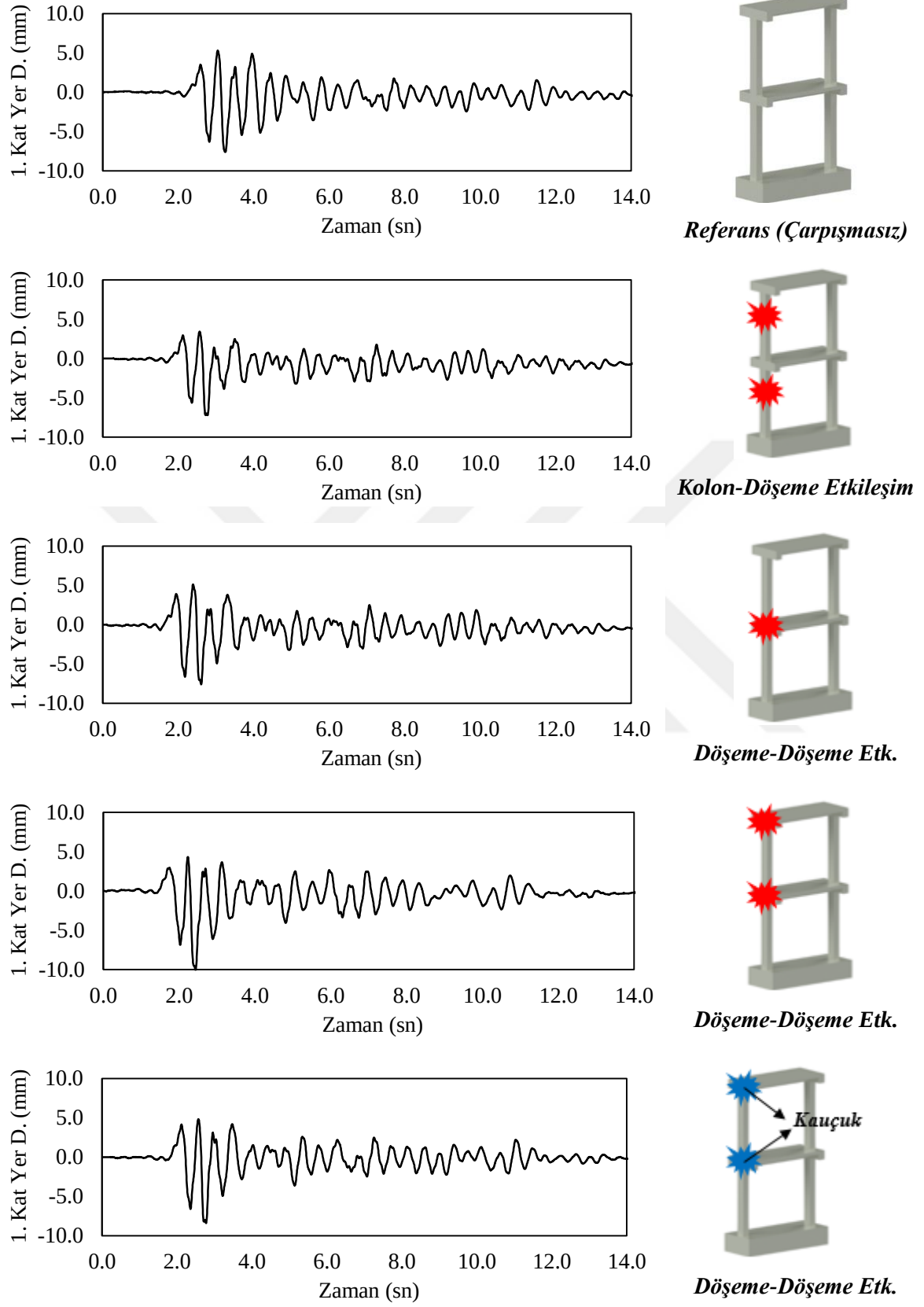
Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
Etkileşimin Olduğu Yöndeki En Büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Referans	3.067	9.825	34.884	43.681	78.760
Deney-1	3.455	6.696	11.824	19.821	25.984
Deney-2	3.677	9.447	22.825	39.322	51.541
Deney-3	4.950	8.353	13.030	19.139	24.936
Deney-4	5.395	8.981	14.348	18.810	24.122
Etkileşimin Olmadığı Serbest Yöndeki En Büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Referans	-6.555	-13.225	-28.676	-63.059	-68.065
Deney-1	-4.985	-13.539	-24.825	-39.086	-57.103
Deney-2	-6.178	-13.757	-22.479	-40.633	-48.079
Deney-3	-9.477	-20.189	-35.503	-52.553	-72.176
Deney-4	-7.409	-16.925	-30.639	-49.917	-77.853



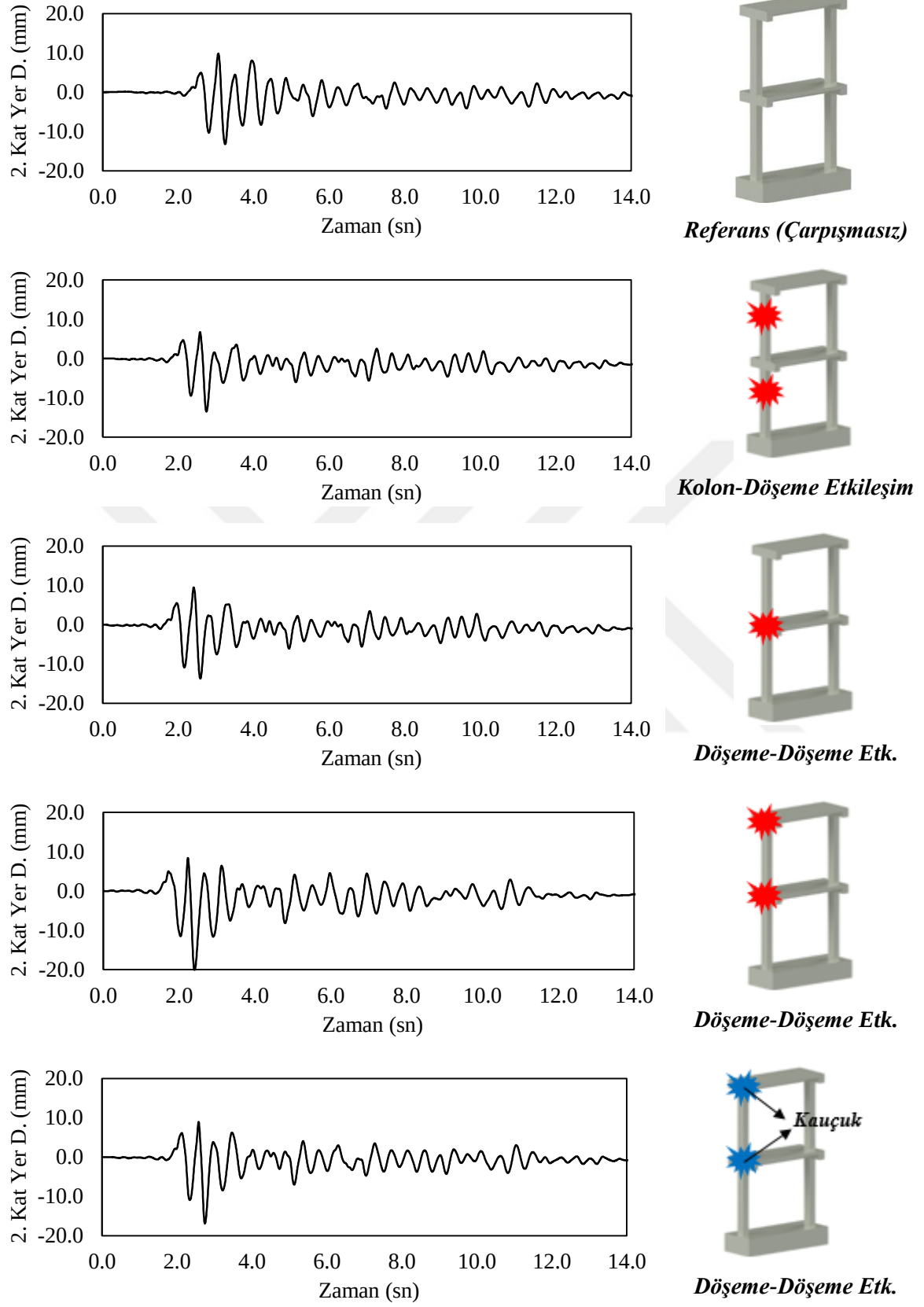
Şekil 3.15. %25 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



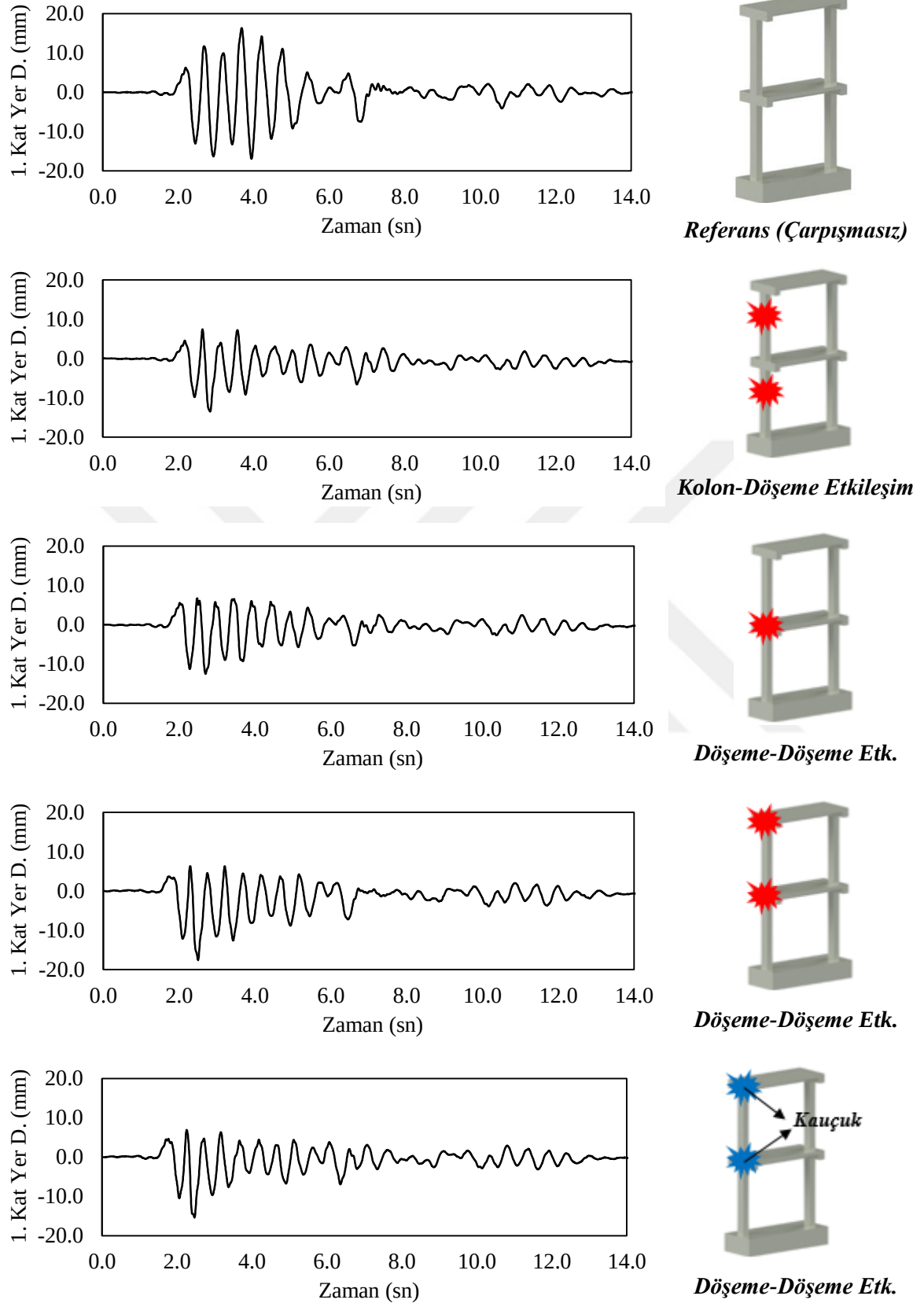
Şekil 3.16. %25 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



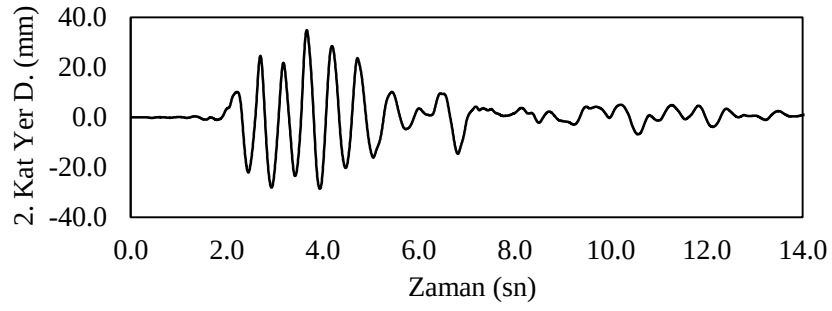
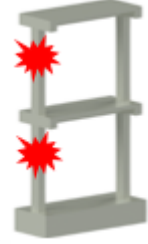
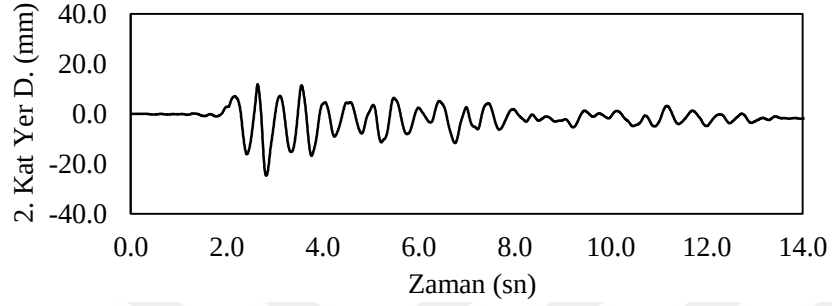
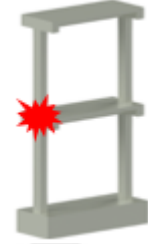
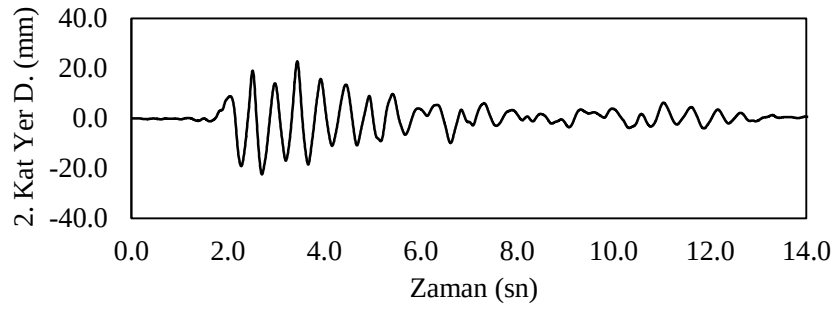
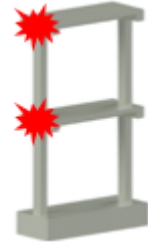
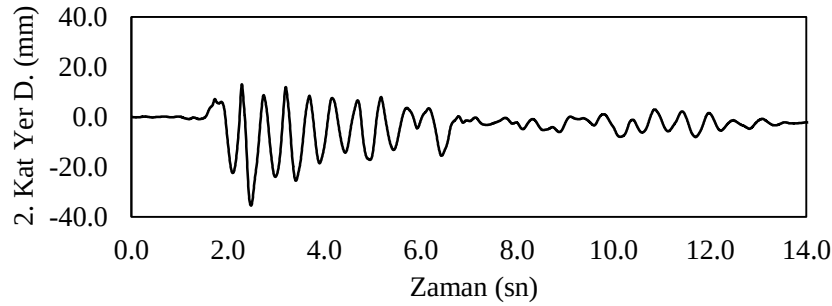
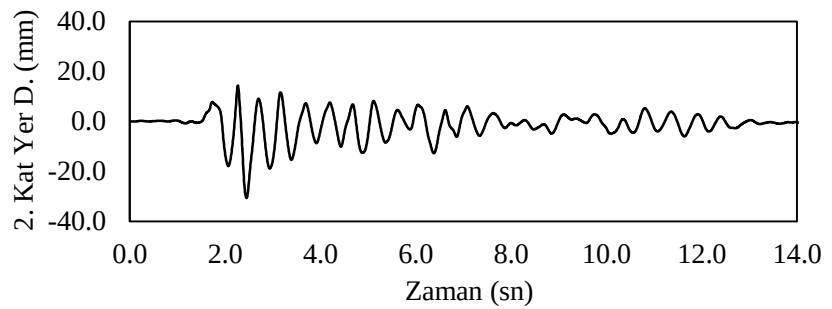
Şekil 3.17. %50 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



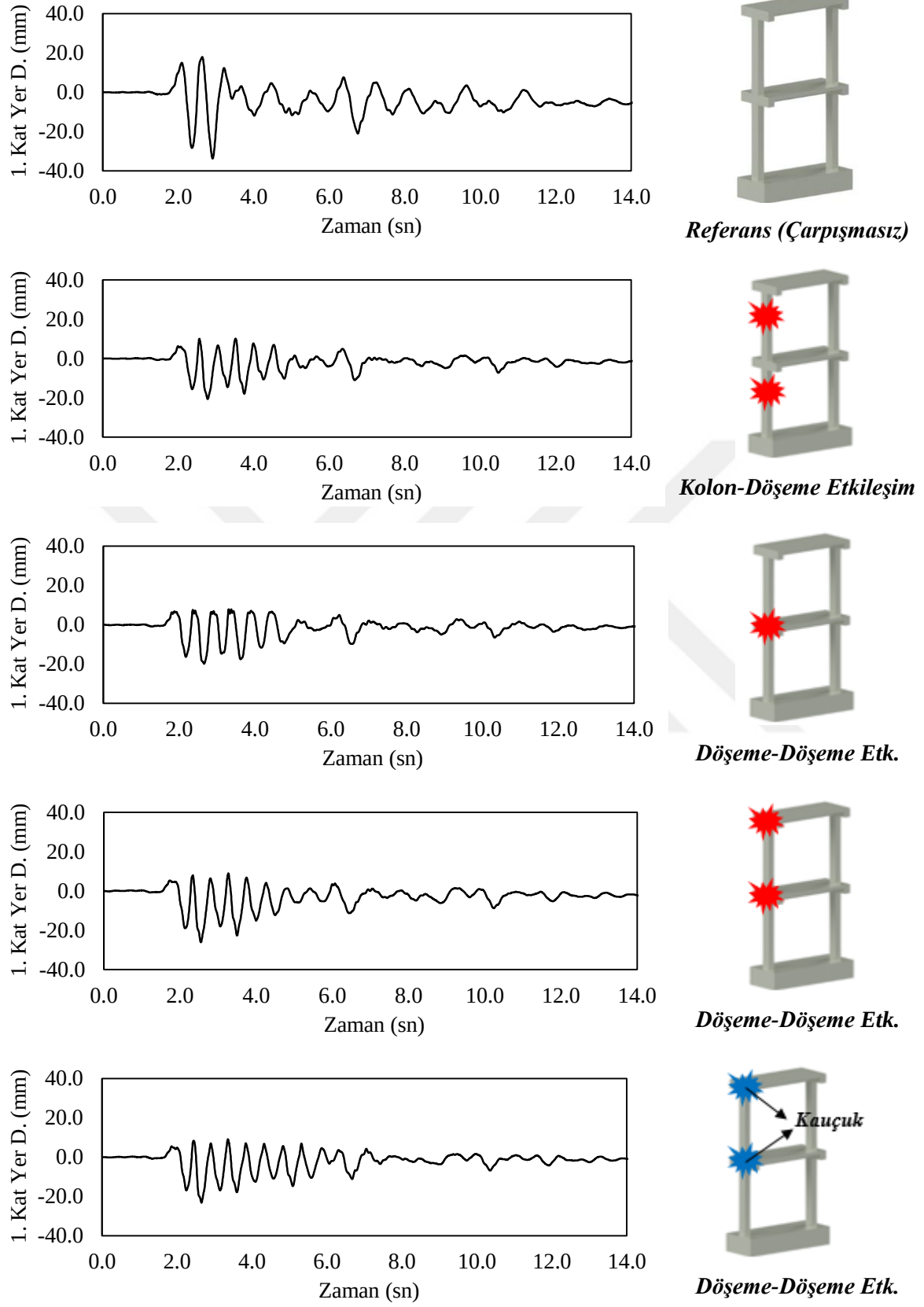
Şekil 3.18. %50 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



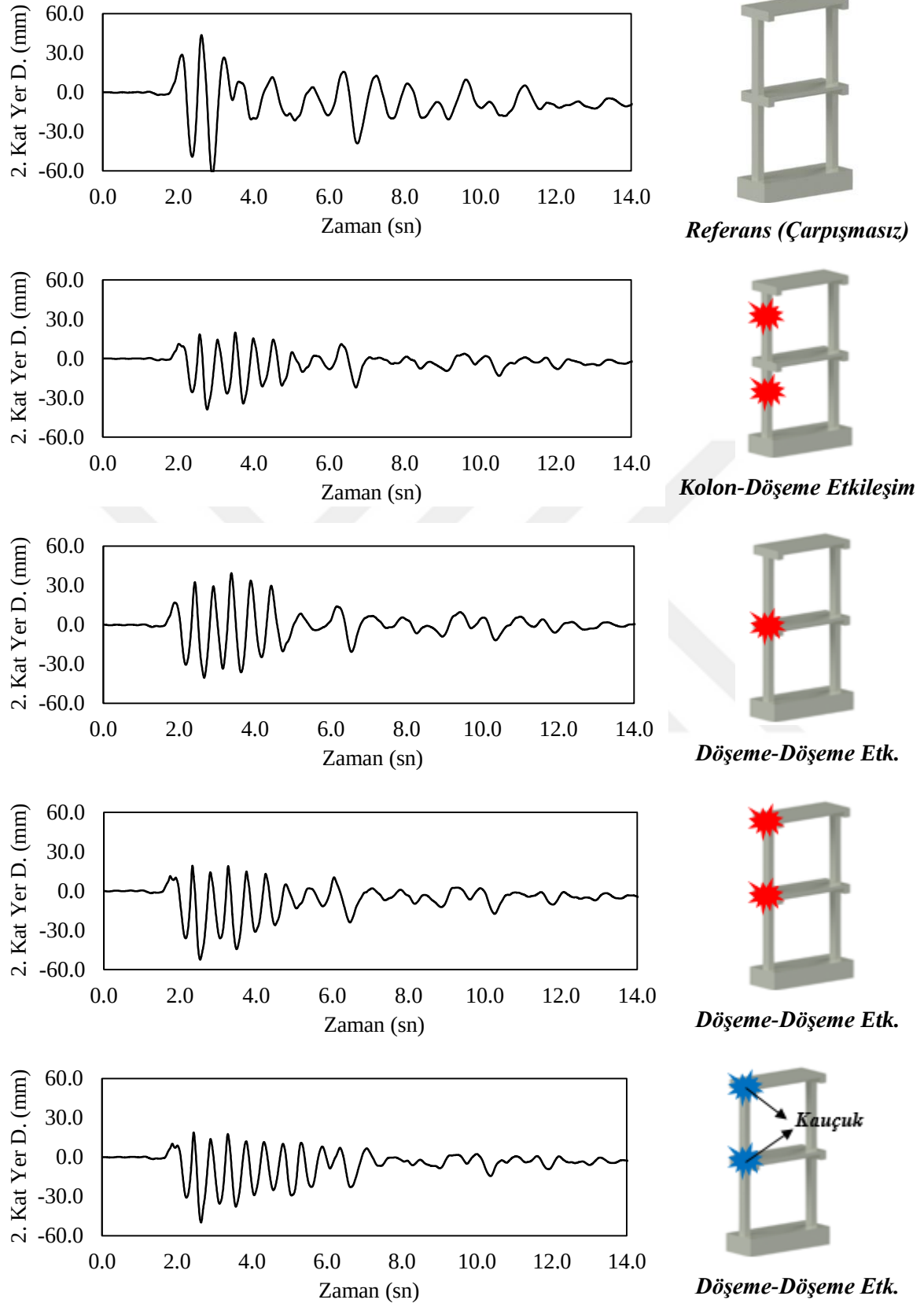
Şekil 3.19. %75 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri

*Referans (Çarpışmasız)**Kolon-Döşeme Etkileşim**Döşeme-Döşeme Etk.**Döşeme-Döşeme Etk.**Döşeme-Döşeme Etk.*

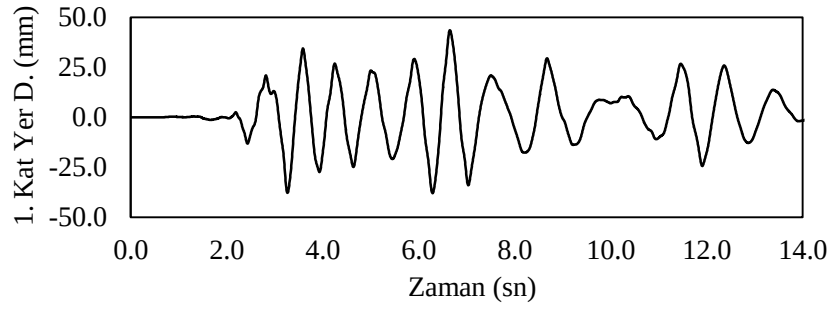
Şekil 3.20. %75 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



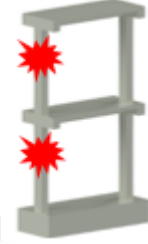
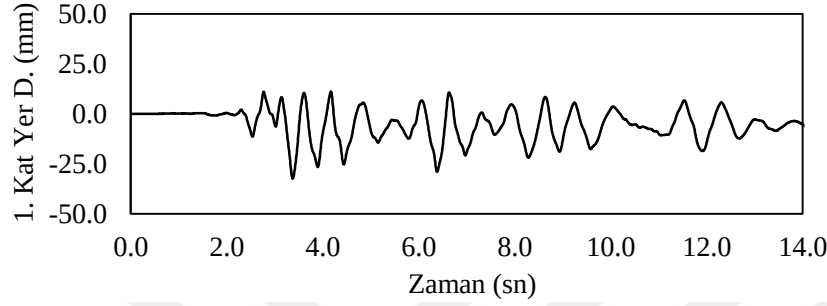
Şekil 3.21. %100 Erzincan depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



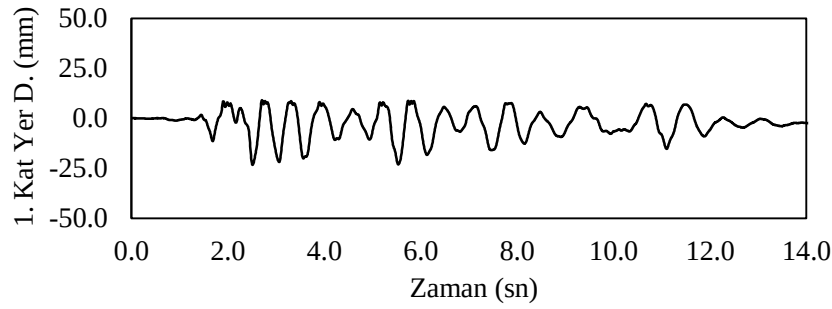
Şekil 3.22. %100 Erzincan depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



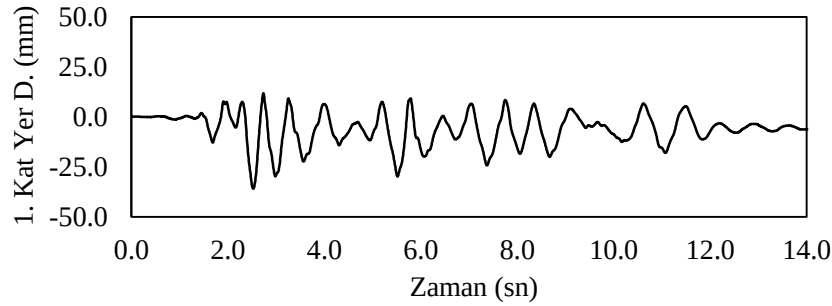
Referans (Çarpışmasız)



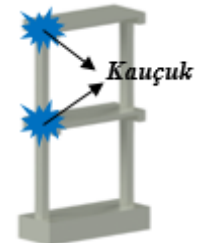
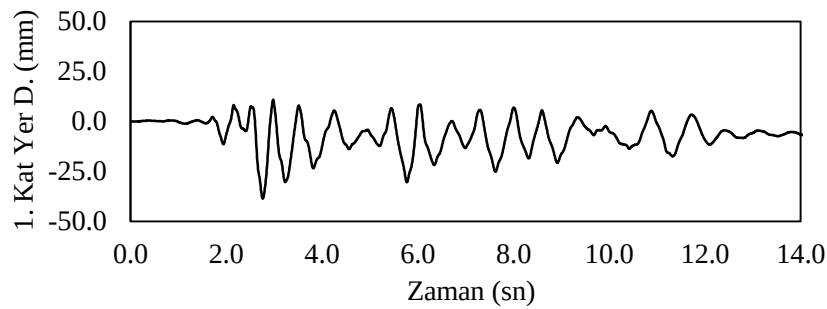
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

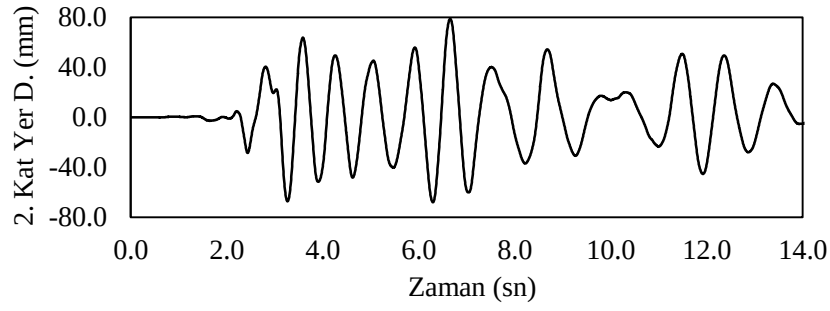


Döşeme-Döşeme Etk.

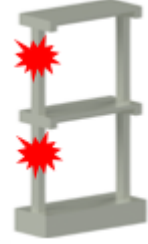
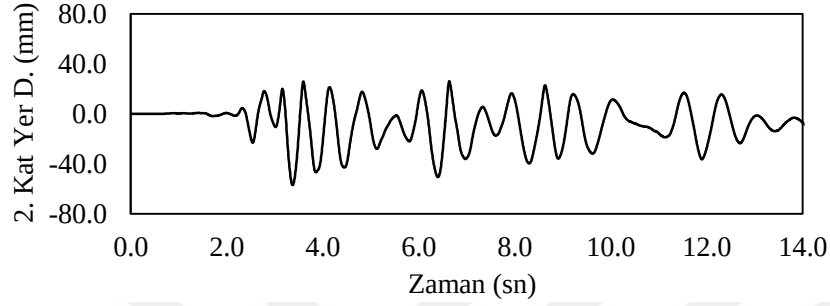


Döşeme-Döşeme Etk.

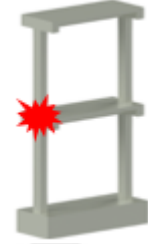
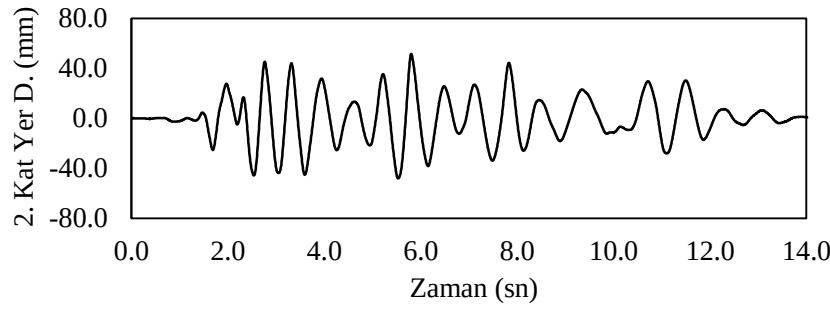
Şekil 3.23. %100 Parkfield depreminde 1. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



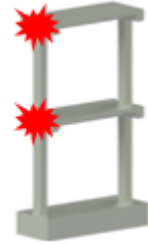
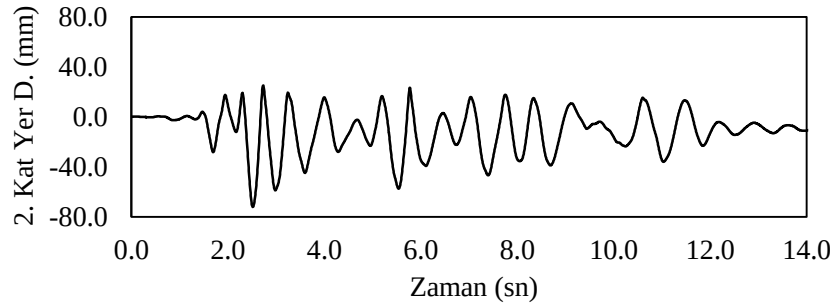
Referans (Çarpışmasız)



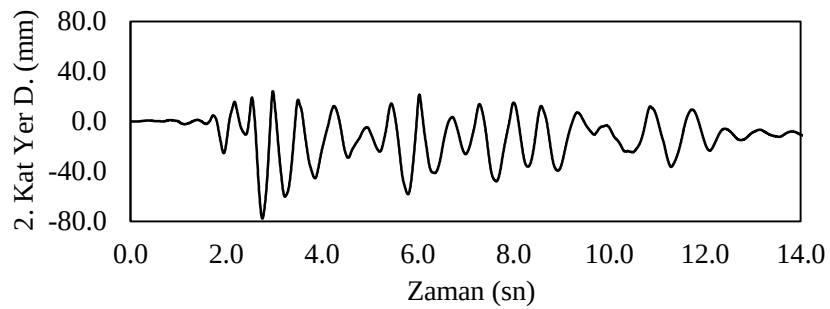
Kolon-Döşeme Etkileşim



Döşeme-Döşeme Etk.

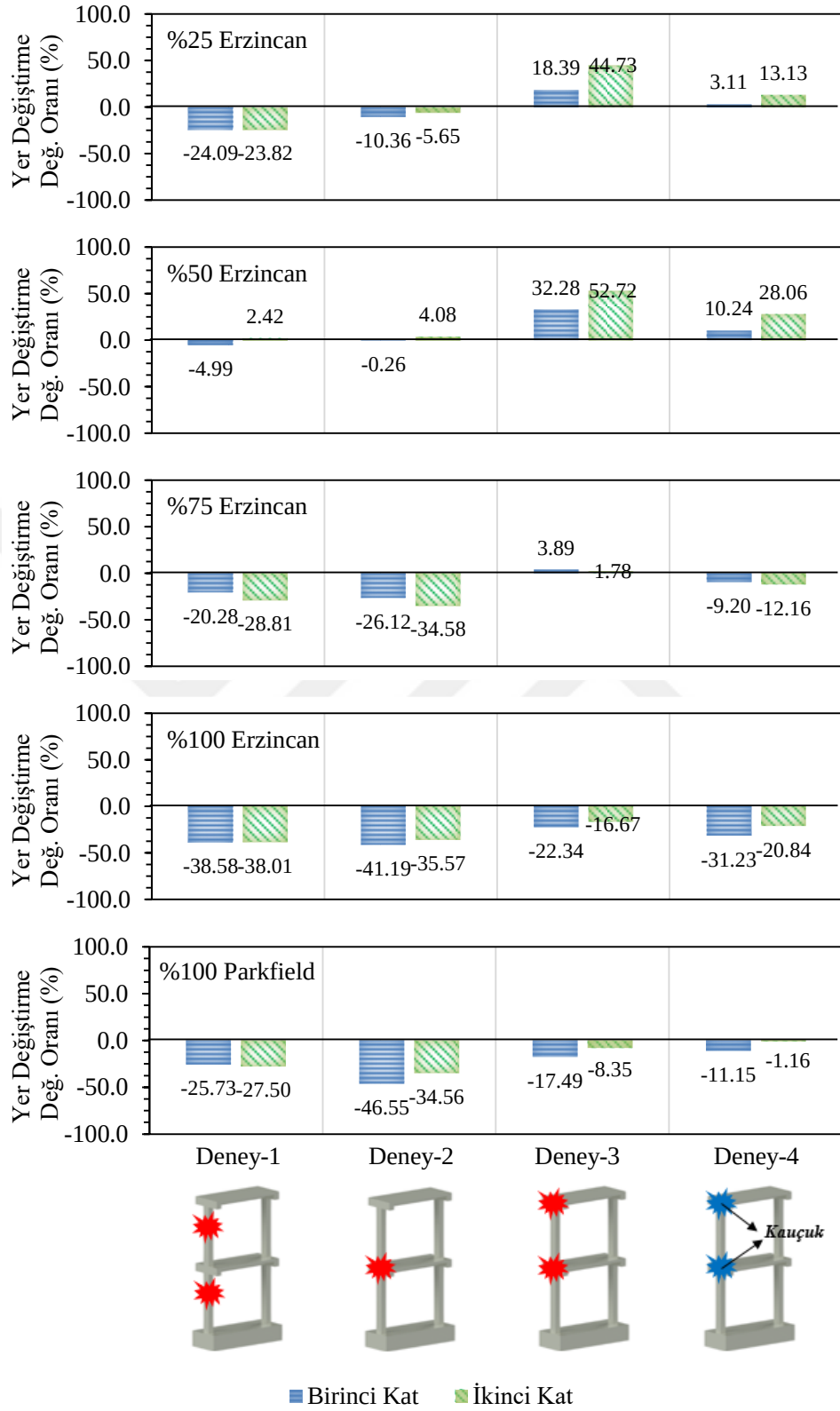


Döşeme-Döşeme Etk.



Döşeme-Döşeme Etk.

Şekil 3.24. %100 Parkfield depreminde 2. katta elde edilen yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.25. Çarpışmanın yer değiştirmeler üzerindeki etkisi

Kat seviyelerinde elde edilen yer değiştirmeler karşılaştırıldığında etkileşimin olduğu yönde en büyük yer değiştirme değerlerinde azalmaların meydana gelmesi yapısal davranış üzerinde çarpışmaların faydalı etkilere neden olacağı düşüncesini doğurabilmektedir. Ancak arpışma sırasında aktarılan enerji nedeniyle yapısal talep dağılımında, çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı duruma kıyasla bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, deneyler sırasında kaydedilen yer değiştirme değerleri üzerinden çarpışma etkilerini incelemek her zaman anlamlı olmayabilir. Dolayısıyla arpışma etkileri altında yapısal davranışta meydana gelen değişimleri gzlemlenenin en etkili yolu, görelili kat öteleme oranlarının karşılıklı olarak incelenmesidir (aycı ve Akpınar, 2021). Bu nedenle çarpışmanın gerçekleştiği ve serbest yönlerdeki görelili kat ötelemeleri oranları Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te sunulmuştur. Ayrıca katlara göre elde edilen görelili kat öteleme oranlarının sarsma masası deneylerinde dikkate alınan her bir deprem düzeyi için karşılaştırmalı olarak şekil 3.26'da verilmiştir.

Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük görelili kat öteleme oranı (yönlerden bağımsız olarak) %25 Erzincan depremi için %0.26-%0.18, %50 Erzincan depremi için %0.51-%0.37, %75 Erzincan depremi için %%1.13-%1.24, %100 Erzincan depremi için %2.25-%1.95 ve %100 Parkfield depremi için %2.90-%2.35 olarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde 1. ve 2. kat seviyeleri için bu görelili kat öteleme oranları sırasıyla %0.20-%0.14, %0.48-%0.42, %0.90-%0.75, %1.38-%1.22 ve %2.16-%1.65'dir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'de 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük görelili kat öteleme oranları %25 Erzincan depremi için %0.23-%0.18, %50 Erzincan depremi için %0.51-%0.41, %75 Erzincan depremi için %0.84-%1.08, %100 Erzincan depremi için %1.32-%2.10 ve %100 Parkfield depremi için %1.55-%2.83 olarak elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3'te 1. kat görelili kat öteleme oranları %0.30 ve %2.40 arasında elde edilirken 2. kat seviyesinde bu değerlerin %0.33 ve %2.42 arasında olduğu belirlenmiştir. Numune ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen görelili kat öteleme oranları %25 Erzincan depremi için %0.27-%0.23, %50 Erzincan depremi için %0.56-%0.57, %75 Erzincan depremi için %1.03-%1.02, %100 Erzincan depremi için %1.55-%1.78 ve %100 Parkfield depremi için %2.58-%2.61 olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.4. 1. Kat seviyesinde elde edilen görelî kat öteleme oranları

Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
Etkileşimin Olduğu Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Referans	0.14	0.35	1.09	1.19	2.90
Deney-1	0.13	0.23	0.49	0.67	0.74
Deney-2	0.19	0.34	0.45	0.52	0.61
Deney-3	0.19	0.29	0.42	0.60	0.79
Deney-4	0.24	0.32	0.46	0.60	0.72
Etkileşimin Olmadığı Serbest Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Referans	0.26	0.51	1.13	2.25	2.53
Deney-1	0.20	0.48	0.90	1.38	2.16
Deney-2	0.23	0.51	0.84	1.32	1.55
Deney-3	0.30	0.67	1.17	1.75	2.40
Deney-4	0.27	0.56	1.03	1.55	2.58

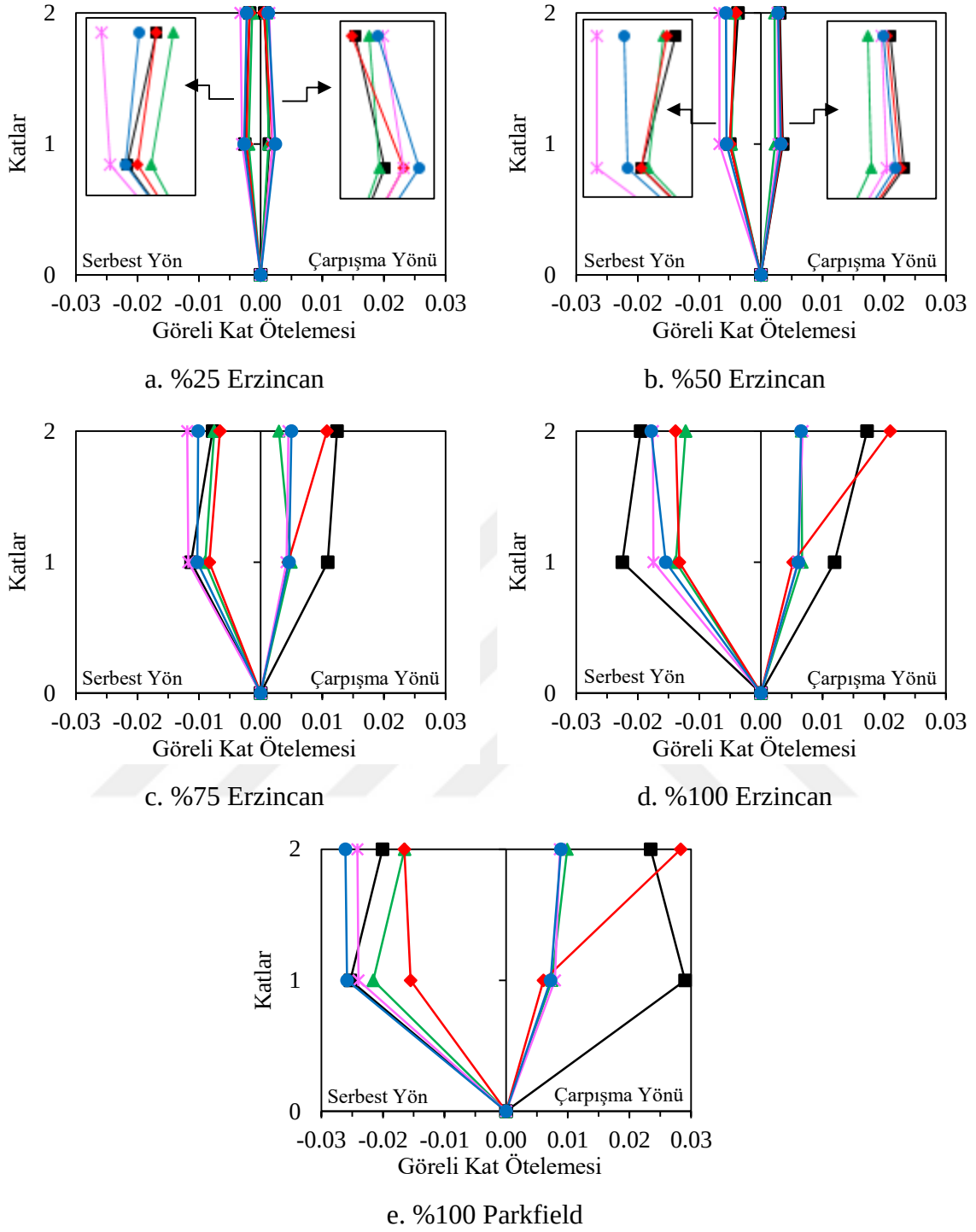
Tablo 3.5. 2. Kat seviyesinde elde edilen görelî kat öteleme oranları

Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
Etkileşimin Olduğu Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Referans	0.06	0.30	1.24	1.72	2.35
Deney-1	0.10	0.22	0.29	0.65	0.99
Deney-2	0.05	0.29	1.08	2.10	2.83
Deney-3	0.14	0.27	0.45	0.68	0.87
Deney-4	0.12	0.28	0.50	0.65	0.89
Etkileşimin Olmadığı Serbest Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Referans	-0.18	-0.37	-0.78	-1.95	-2.01
Deney-1	-0.14	-0.42	-0.75	-1.22	-1.65
Deney-2	-0.18	-0.41	-0.66	-1.39	-1.65
Deney-3	-0.33	-0.67	-1.19	-1.76	-2.42
Deney-4	-0.23	-0.57	-1.02	-1.78	-2.61

Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Şekil 3.26'dan görüleceği üzere çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı referans deney ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilen görelî kat öteleme grafikleri kıyaslandığında, etkileşimin olduğu yönde görelî kat öteleme oranları çarpışma nedeniyle genellikle azalmaktadır. Çarpışma duvarının etkileşim sırasında yapının hareketini sınırlaması nedeniyle bu davranış beklenen bir durumdur. Ancak farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türünün incelendiği Deney-2'de etkileşimin sadece 1. kat düzeyinde olması nedeniyle yer hareketi büyüklüğü arttıkça (%50 Erzincan, %75 Erzincan depremleri) 2. kat görelî öteleme oranları da diğer çarpışmalara kıyasla oldukça

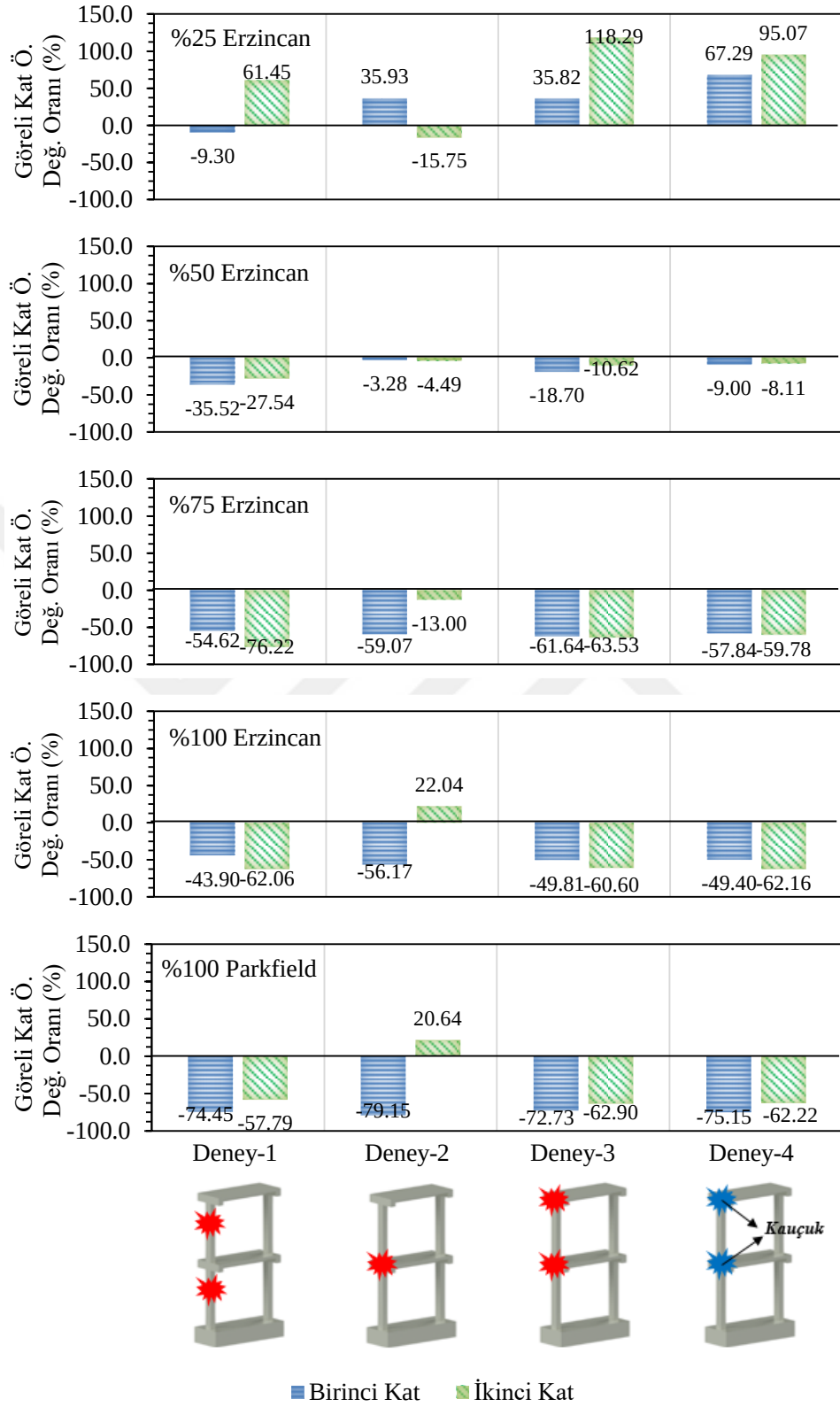
artmaktadır. %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremleri sonrasında bu çarpışma türünde 2. kat görelî kat öteleme oranları, referans deneyde dahil olmak üzere diğêr deneylerden elde edilenlere göre çok daha büyüktür. Şekil 3.27’de çarpışmanın dikkate alınmadığı referans deneye kıyasla görelî kat öteleme oranlarının çarpışma türlerine göre değışimi çarpışmanın gerçekleştiğı yön için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türünde %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremlerinde 2. kat görelî kat öteleme oranları referans deneye kıyasla %22.04 ve %20.64 artmıştır. Bu çarpışma türünde alt katta meydana gelen etkileşim daha fazla yer değıştirme yapabilecek üst katları engellemektedir. Dolayısıyla çarpışma sırasında katlar arasındaki büyük görelî kat ötelemeleri hem çarpışma bölgesinde hem de çarpışma bölgesi üstündeki katlarda ciddi hasarların oluşabileceğini göstermektedir. Bu durum Şekil 3.26’da verilen görelî kat öteleme oranlarının katlara göre dağılımında da belirgin olarak gözlemlenmektedir. Diğêr çarpışma türlerinde ise çarpışma yönünde benzer yapısal davranış gözlenmiştir.

Şekil 3.28’de çarpışmanın dikkate alınmadığı referans deneye kıyasla görelî kat öteleme oranlarının çarpışma türlerine göre değışimi serbest yön için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu yönde en küçük görelî kat öteleme oranları kolon-döşeme etkileşiminin dikkate alındığı Deney-1’de ve farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türünün incelendiğı Deney-2’de elde edilmiştir. Ancak özellikle etkileşimin kolon-döşeme arasında gerçekleştiğı durumda oluşan çarpışma kuvvetleri kolonların kesme kapasitesi önemli ölçüde aşabilmekte ve kolonlar ciddi hasarlarına neden olabilmektedir. Bu durum ileri bölümlerde verilen çatlak dağılımlarında da belirgin bir şekilde görölmektedir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3 ve binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen Deney-4’te etkileşim olmadığı serbest yönde diğêr çarpışma türlerine göre daha büyük görelî kat öteleme oranları elde edilmiştir (Şekil 3.26 ve Şekil 3.28). Şekil 3.1-3.10’dan da göröleceğı üzere Deney-3 ve Deney-4’te elde edilen kat ivme değıerleri diğêr çarpışma türlerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilenlere kıyasla daha büyüktür. Kat ivmeleri ile orantılı olarak artan çarpışma kuvvetlerinin aktarılan enerjiyi artırması etkileşimin olmadığı serbest yönde daha yüksek yer değıştirme taleplerine neden olmaktadır.

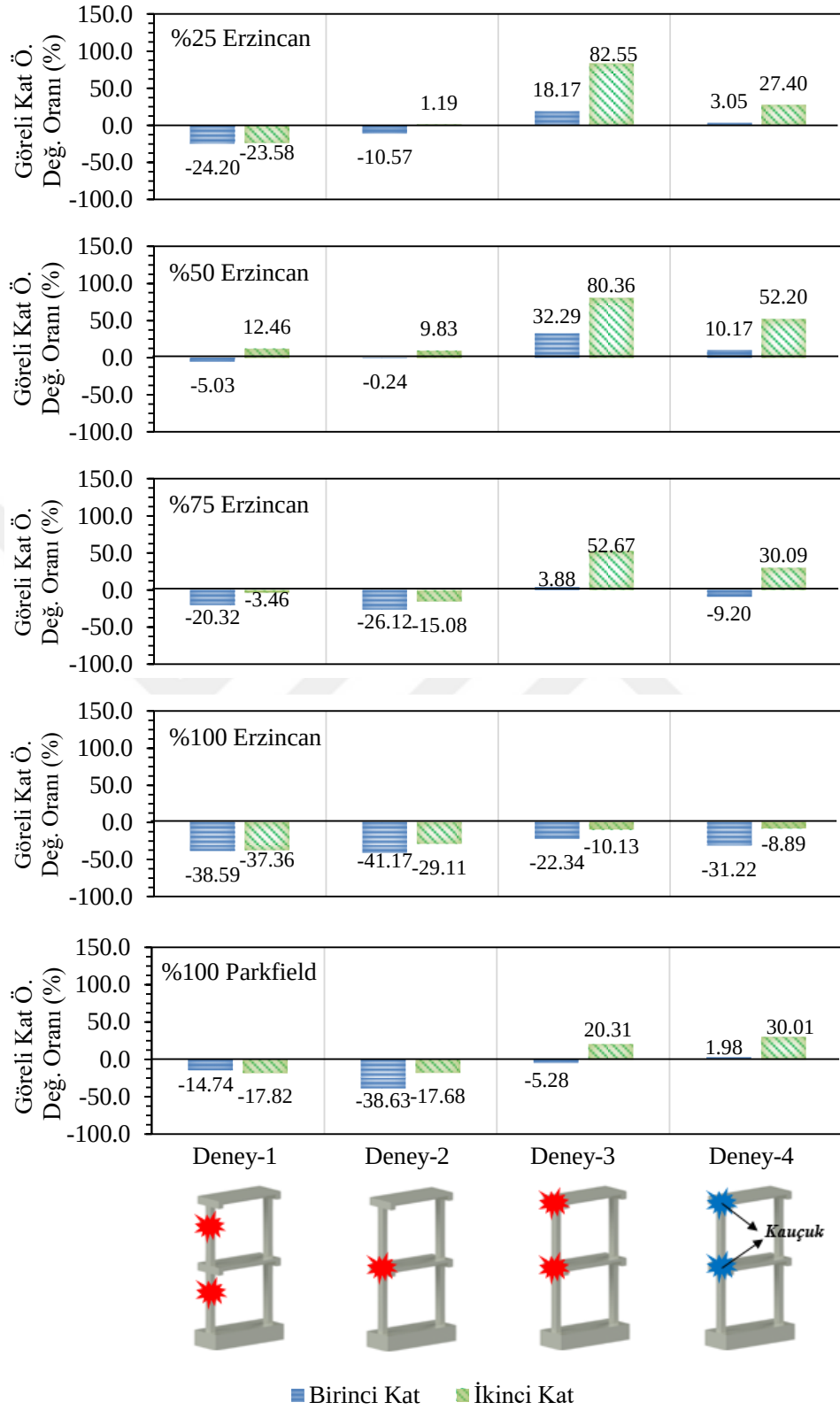


- Referans Deney
- ▲— Deney-1 (Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması)
- ◆— Deney-2 (Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması)
- *— Deney-3 (Aynı yükseliğe sahip binaların çarpışması)
- Deney-4 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması-Kauçuklu)

Şekil 3.26. Görel kat öteleme oranları



Şekil 3.27. Referans deneye kıyasla çarpışmanın gerçekleştiği yönde görelî kat ötelemesi oranlarında meydana gelen değişimler



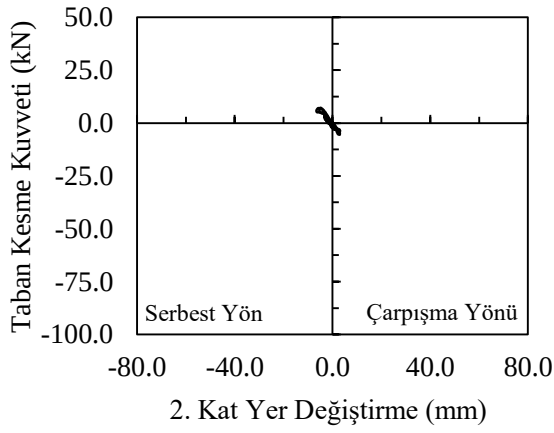
Şekil 3.28. Referans deneye kıyasla çarpışmanın olmadığı serbest yönde görelî kat ötelemesi oranlarında meydana gelen değişimler

3.4. Taban Kesme Kuvvetleri

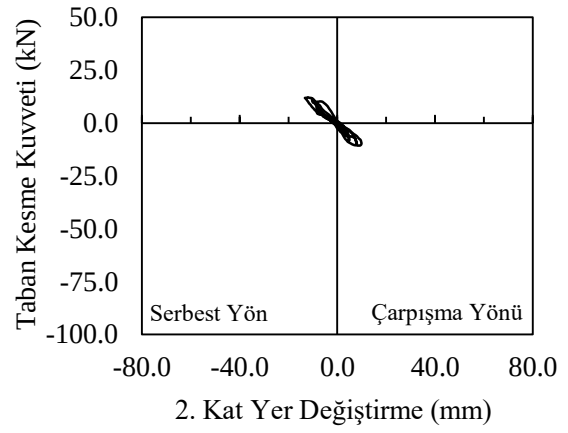
Çarpışma testleri sırasında test numunelerinin histerezis tepkilerini takip etmek ve komşu binalar arasındaki etkileşimin yapısal davranış üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.29-3.33'te sunulmuştur. Bu grafiklerdeki yer değiştirmeler, temel ve 2. kat seviyesinde potansiyometrik cetveller ile kaydedilen yer değiştirmelerin farkları alınarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvvetleri ise her bir kat seviyesine yerleştirilen ivmeölçer verileri ile ilgili kat kütlelerinin çarpımından elde edilen değerlerin toplanması ile elde edilmiştir. Hesaplamalarda, 1. katın alt yarısına ait kütlelerin katkısı, numunenin sarsma masasına bağlı olması nedeniyle ihmal edilmiştir (Miglietta vd., 2021). İvme verileri ise kat seviyesine yerleştirilen tek eksenli kablolu ivmeölçerlerden elde edilmiştir (Şekil 2.36).

Şekil 3.29'dan görüleceği üzere çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney numunesi %25 Erzincan ve %50 Erzincan depremlerinde doğrusal davranış gösterirken artımlı olarak uygulanan sonraki deneylerde doğrusal olmayan davranış sergilemiştir. Ancak sarsma masası deneylerinde statik ve yarı-statik deneylere kıyasla sürenin oldukça kısa olması ve sorunlara karşı anında müdahale etme imkanının bulunmaması ve ölçüm aletlerinin güvenliği gibi nedenlerle numuneler dayanım azalmasına geçmeden deneyler sonlandırılmıştır. Sevil vd. (2010), bu tez çalışmasındaki deney numunelerine benzer tek açıklıklı ve iki katlı yalın betonarme çerçevenin tersinir-tekrarlanır yükleme altında yapısal davranışını incelemiştir. Sarsma masası deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde deney numunesinin ilk birkaç çevrimsel yüklemede doğrusal davranış sergilediğini ve daha sonra düşük yük seviyesinde bile büyük yer değiştirmeler yaparak doğrusal olmayan davranış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

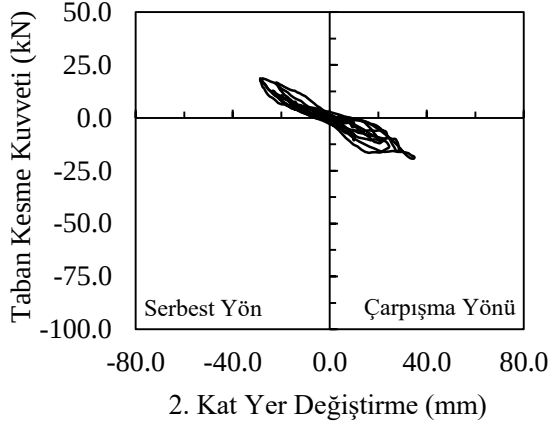
Daha önceki bölümlerde detaylı olarak tartışıldığı üzere komşu binaların çarpışması sırasında hızda meydana gelen ani değişiklikler, ivme değerlerinde kısa süreli ve yüksek genlikte pikler oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum taban ve kat kesme kuvvetlerinde önemli artışlara neden olabilmektedir. Şekil 3.30-3.33'ten görüleceği üzere çarpışmanın olduğu yönde yer değiştirmeler etkileşim nedeniyle ani bir şekilde sınırlandırılmakta, taban kesme kuvvetleri önemli düzeyde artmaktadır. Bu durum komşu binalar arasındaki çarpışmaların yapısal davranış üzerinde kritik etkilerinin olduğunu göstermektedir.



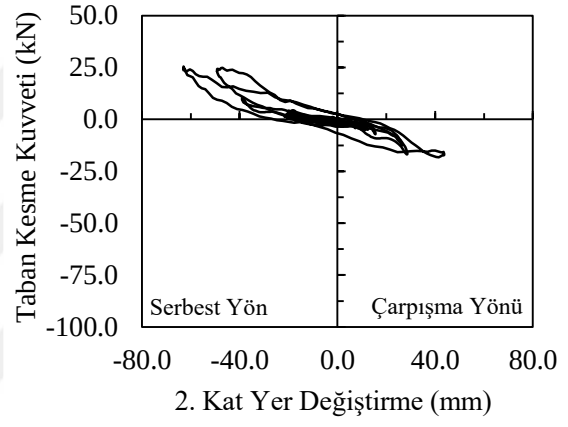
a. %25 Erzincan depremi



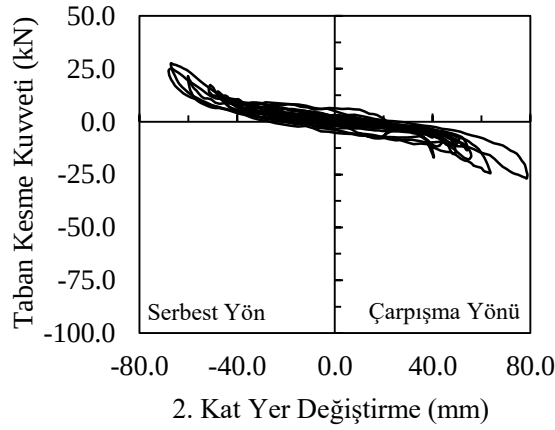
b. %50 Erzincan depremi



c. %75 Erzincan depremi

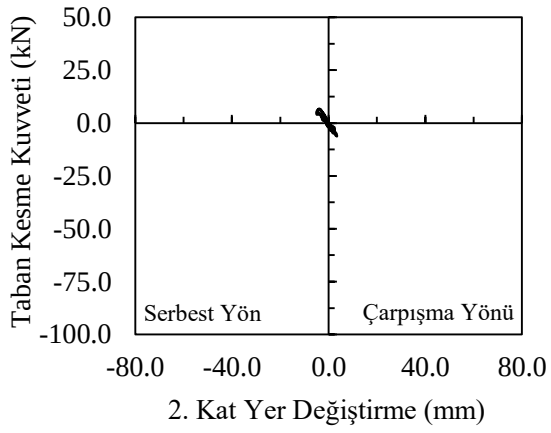


d. %100 Erzincan depremi

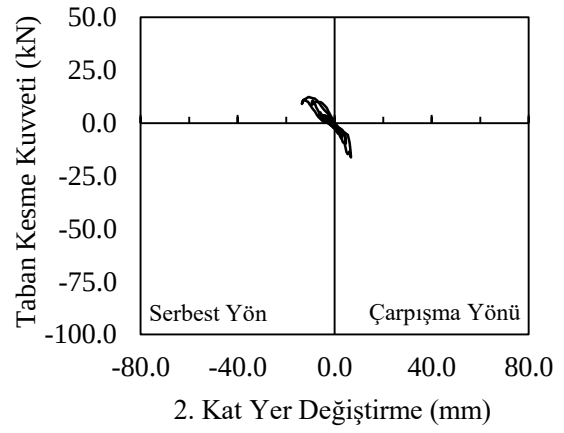


e. %100 Parkfield depremi

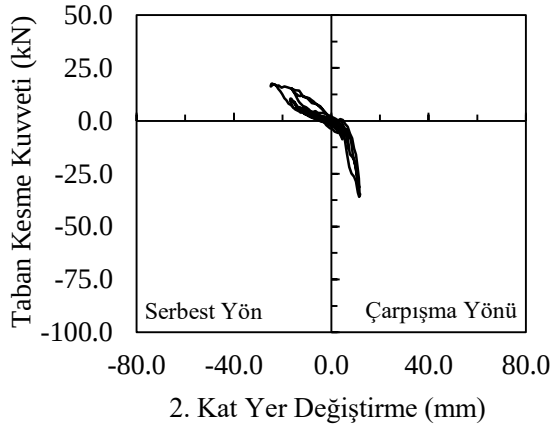
Şekil 3.29. Referans deneye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



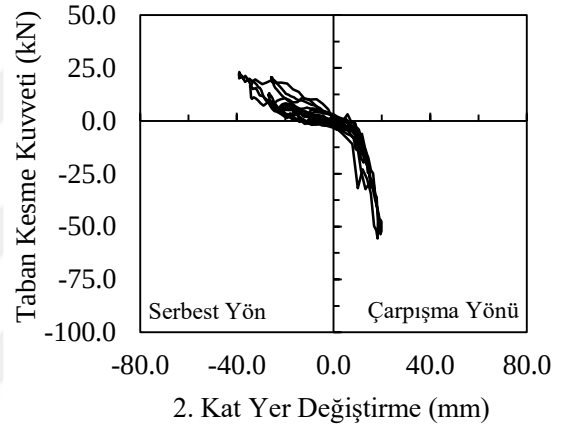
a. %25 Erzincan depremi



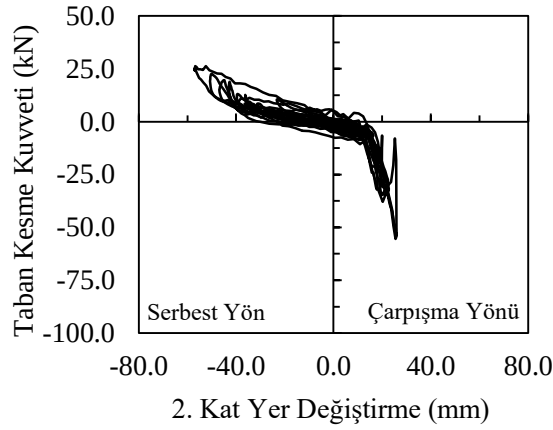
b. %50 Erzincan depremi



c. %75 Erzincan depremi

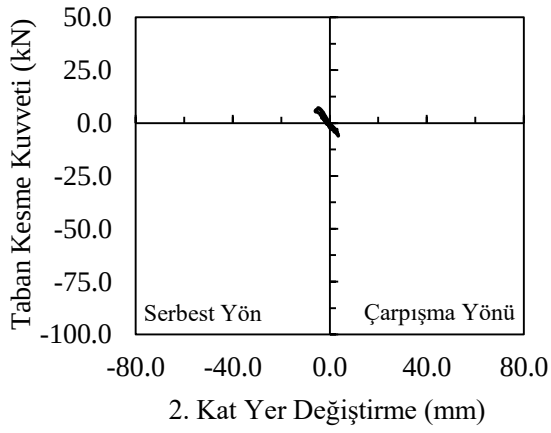


d. %100 Erzincan depremi

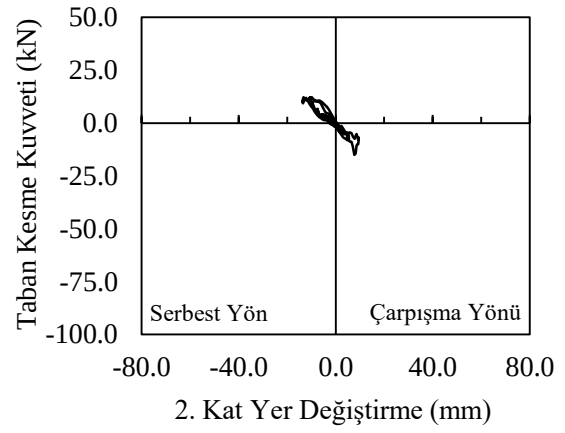


e. %100 Parkfield depremi

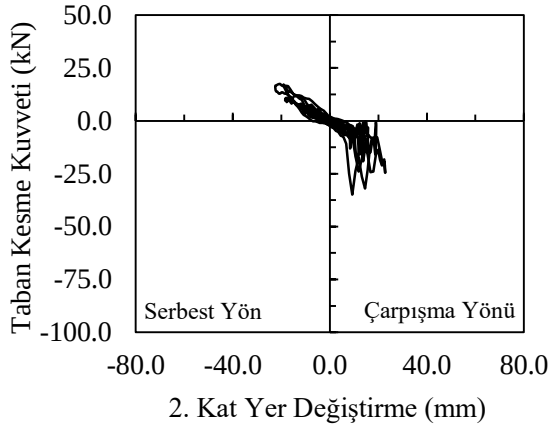
Şekil 3.30. Deney-1'e ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



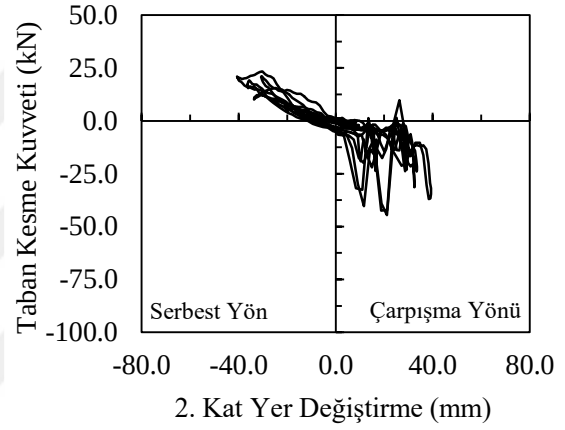
a. %25 Erzincan depremi



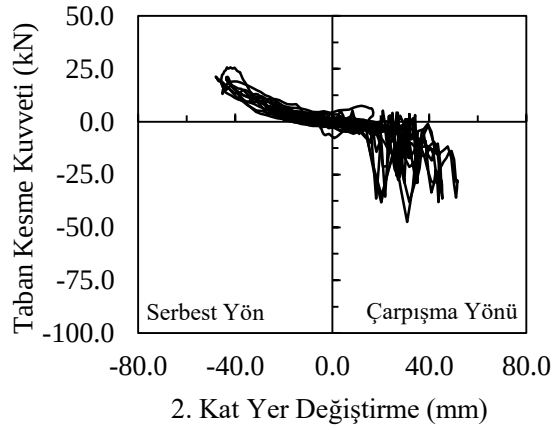
b. %50 Erzincan depremi



c. %75 Erzincan depremi

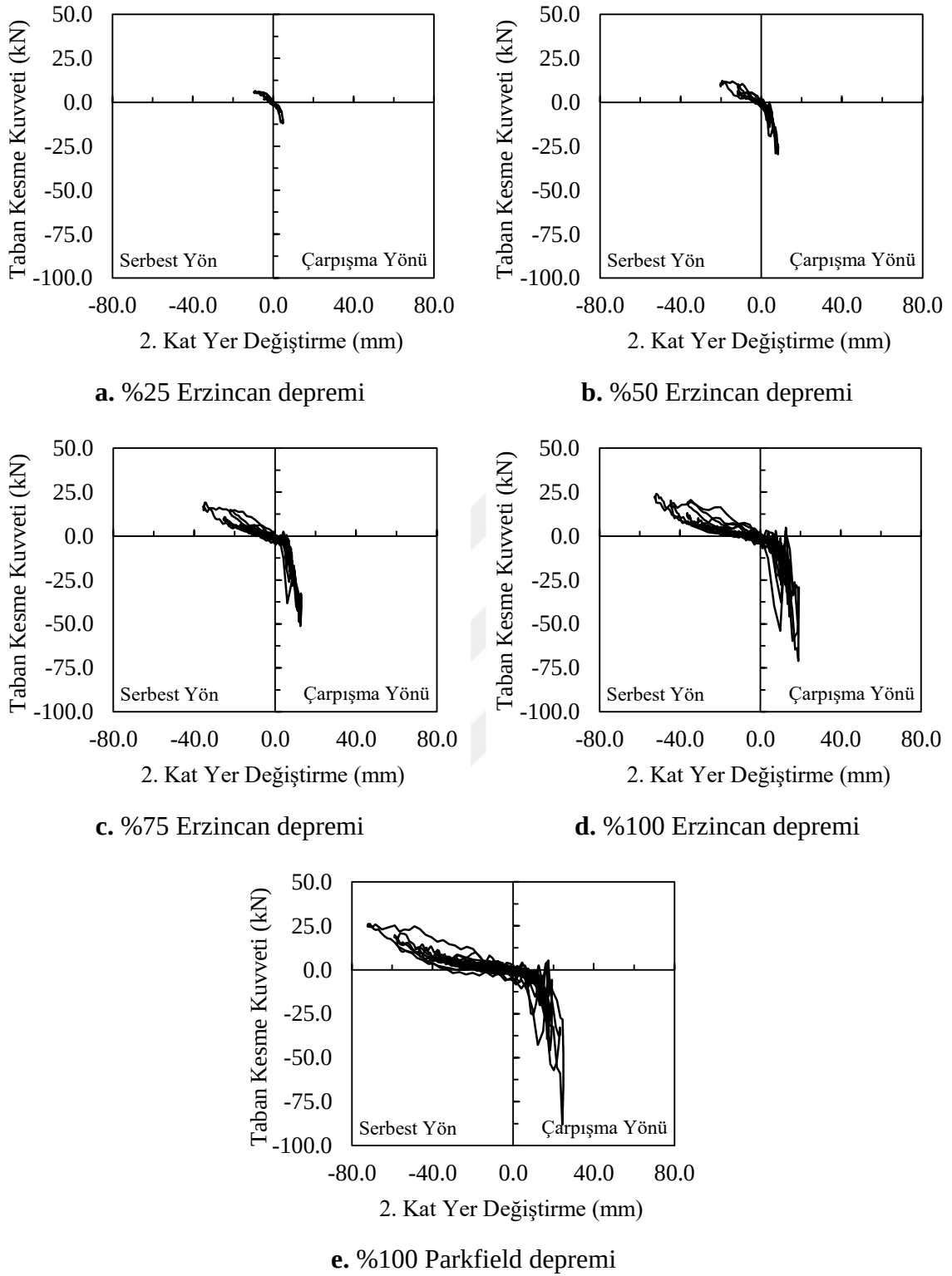


d. %100 Erzincan depremi

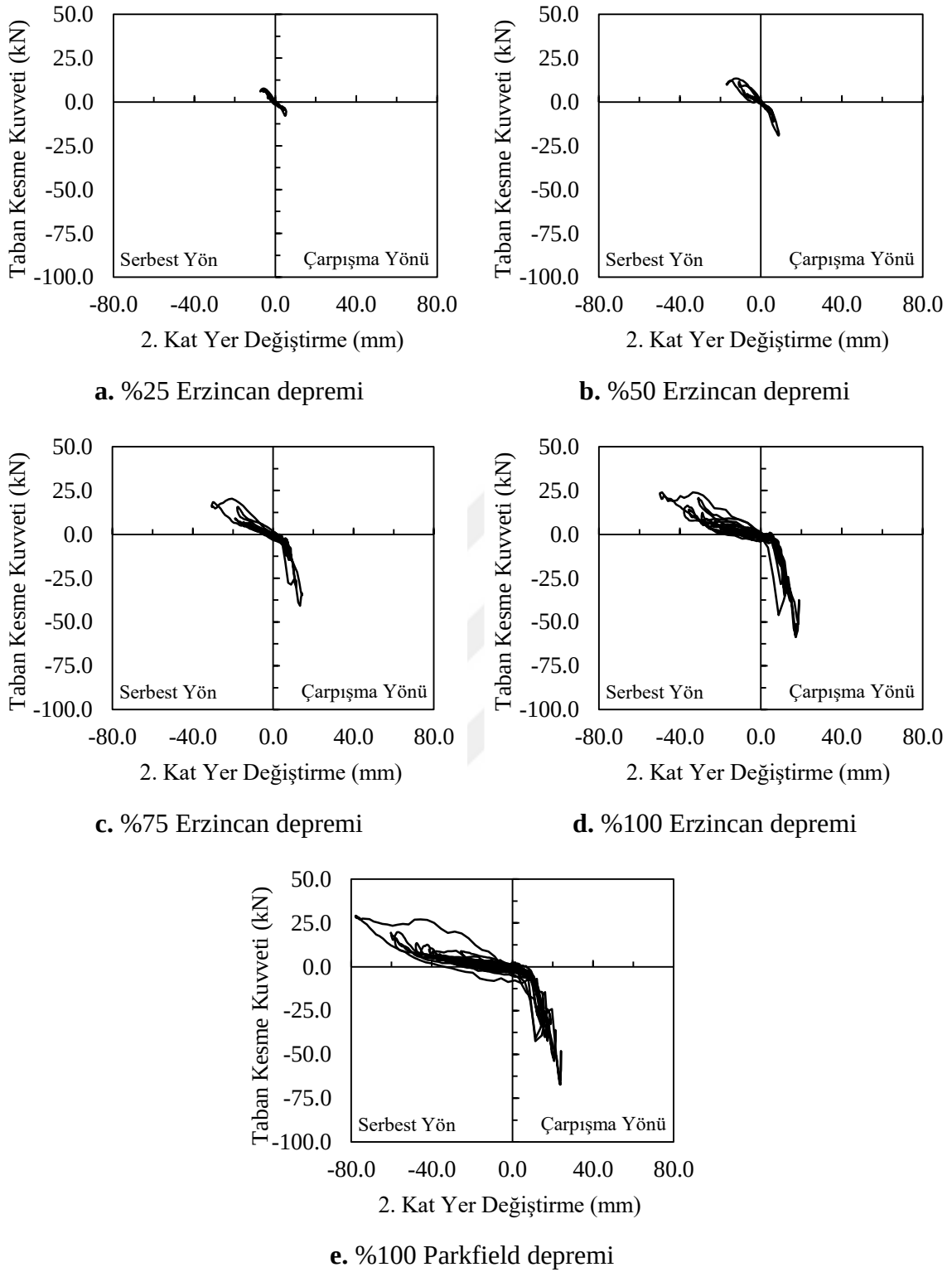


e. %100 Parkfield depremi

Şekil 3.31. Deney-2'ye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.32. Deney-3'ye ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.33. Deney-4'e ait taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Tablo 3.6'da sarsma masası deneyleri sırasında elde edilen taban kesme kuvvetleri verilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde elde edilen en büyük

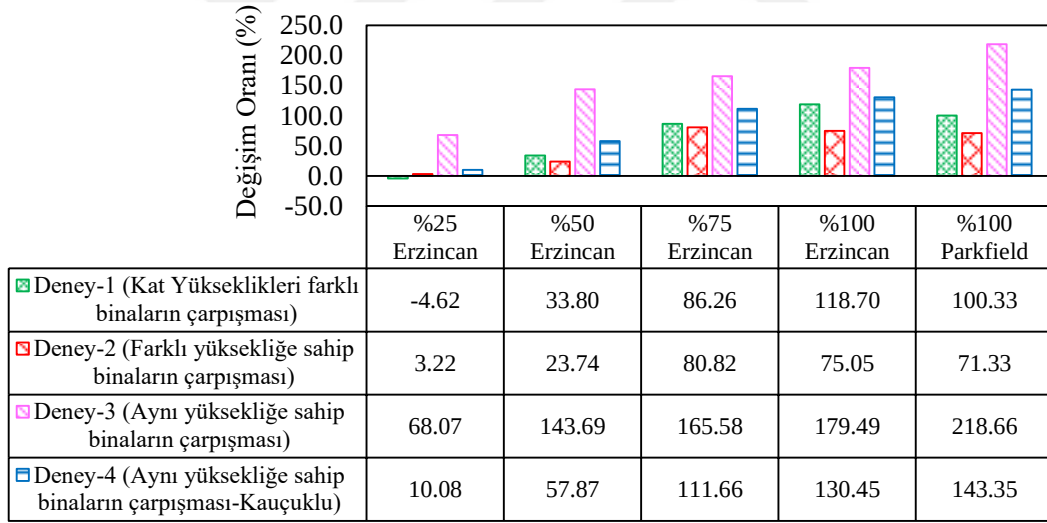
taban kesme kuvveti %25 Erzincan depremi için 7.14kN, %50 Erzincan depremi için 12.13kN, %75 Erzincan depremi için 19.29kN, %100 Erzincan depremi için 25.45kN ve %100 Parkfield depremi için 27.66kN olarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneyler için bu değerler sırasıyla 6.81kN, 16.23kN, 35.93kN, 55.66kN ve 55.41kN'dir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'de elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri %25 Erzincan depremi için 7.37kN, %50 Erzincan depremi için 15.01kN, %75 Erzincan depremi için 34.88kN, %100 Erzincan depremi için 44.55kN ve %100 Parkfield depremi için 47.39kN olarak elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3'te taban kuvveti değerleri 12.00kN ve 88.14kN arasında elde edilmiştir. Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise en büyük taban kesme kuvvetleri %25 Erzincan depremi için 7.86kN, %50 Erzincan depremi için 19.15kN, %75 Erzincan depremi için 40.83kN, %100 Erzincan depremi için 58.65kN ve %100 Parkfield depremi için 67.31kN olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.6. Taban kesme kuvvetleri

Deney/Yer Hareketi	%25 Erzincan	%50 Erzincan	%75 Erzincan	%100 Erzincan	%100 Parkfield
Taban Kesme Kuvvetleri (kN)					
Referans	7.14	12.13	19.29	25.45	27.66
Deney-1	6.81	16.23	35.93	55.66	55.41
Deney-2	7.37	15.01	34.88	44.55	47.39
Deney-3	12.00	29.56	51.23	71.13	88.14
Deney-4	7.86	19.15	40.83	58.65	67.31

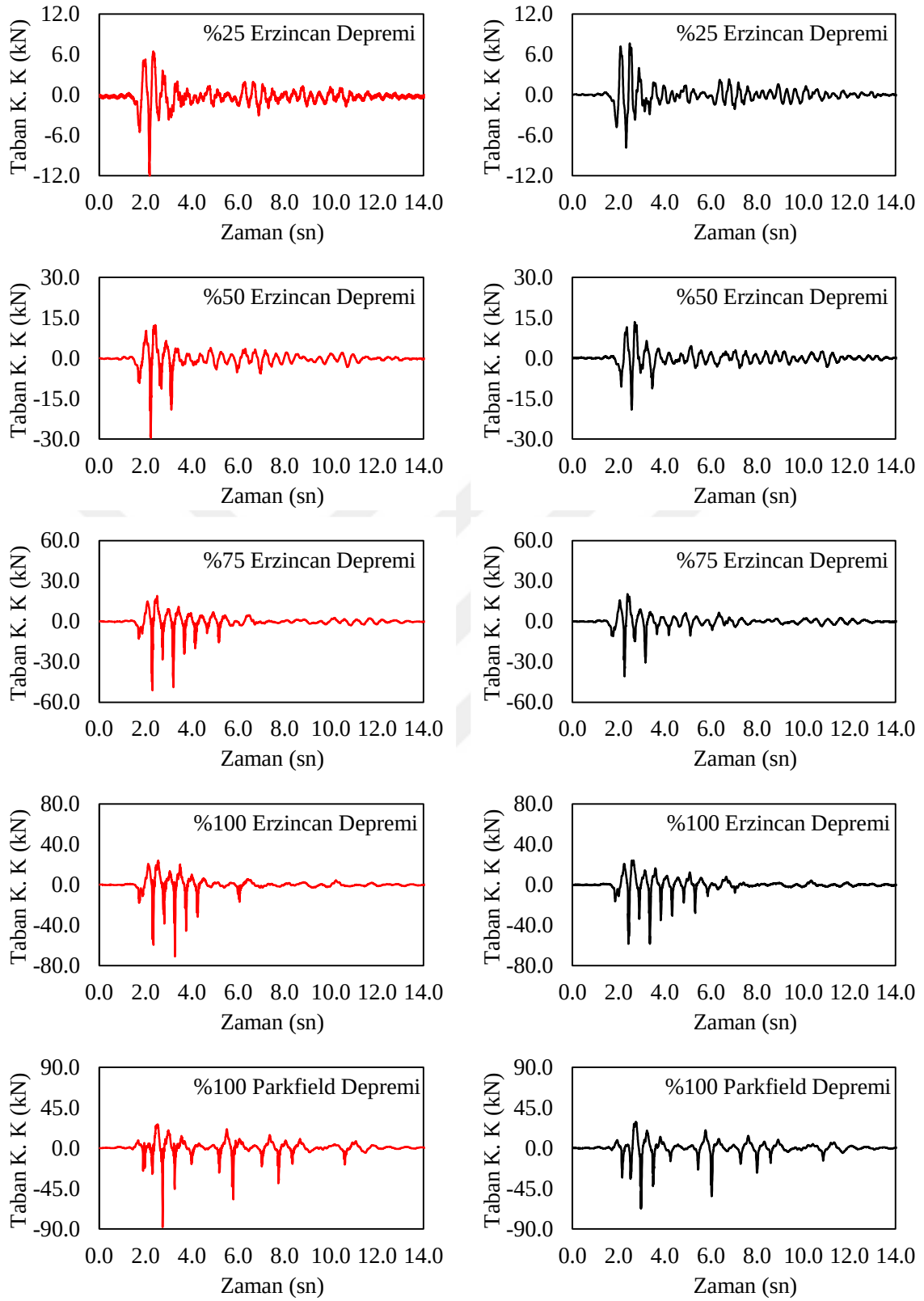
Sarsma masası deneyleri sırasında en büyük taban kesme kuvvetlerinde çarpışma nedeniyle oluşan değişimler Şekil 3.34 ile sunulmuştur. Bu yüzdesel değişimler çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney sonuçları ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney 1-4 sonuçları kıyaslanarak elde edilmiştir. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde %25 Erzincan depremi için en büyük taban kesme kuvveti, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %4.62 azalırken, %50 Erzincan depremi için %33.80, %75 Erzincan depremi için %86.26, %100

Erzincan depremi için %118.70 ve %100 Parkfield depremi için %100.33 artmıştır. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de bu artış %25 Erzincan depremi için %3.22, %50 Erzincan depremi için %23.74, %75 Erzincan depremi için %80.82, %100 Erzincan depremi için %75.05 ve %100 Parkfield depremi için %71.33 olarak hesaplanmıştır. Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3’te Referans deneye kıyasla taban kesme kuvvetlerindeki artışlar %68.07-%218.66 arasında değişmektedir. Kat ivme değerlerini en çok artıran bu çarpışma türünde Şekil 3.34’ten de görüleceği üzere diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyük yapısal tepkiler ortaya çıkmaktadır. Çarpışma bölgelerine kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise taban kesme kuvvetlerinde meydana gelen artışlar, %25 Erzincan depremi için %10.08, %50 Erzincan depremi için %57.87, %75 Erzincan depremi için %111.66, %100 Erzincan depremi için %130.45 ve %100 Parkfield depremi için %143.35 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.34. Referans deneye kıyasla taban kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişimler (%)

Kauçuk levhanın çarpışma etkilerini azaltmadaki etkinliğini araştırmak amacıyla Deney-3 ve Deney-4’e ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.35’te sunulmuştur. Tablo 3.6 ve Şekil 3.35’ten görüleceği üzere kauçuk levhalar taban kesme kuvvetlerini %25 Erzincan depremi için %52.67, %50 Erzincan depremi için %54.36, %75 Erzincan depremi için %25.47, %100 Erzincan depremi için %21.27 ve %100 Parkfield depremi için %30.94 azaltmıştır.



a. Deney-3 (Aynı yüksekliği sahip binaların çarpışması)

b. Deney-4 (Aynı yüksekliği sahip binaların çarpışması-Kauçuklu)

Şekil 3.35. Deney-3 ve Deney-4'e ait taban kesme kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

3.5. Dinamik Karakteristikler

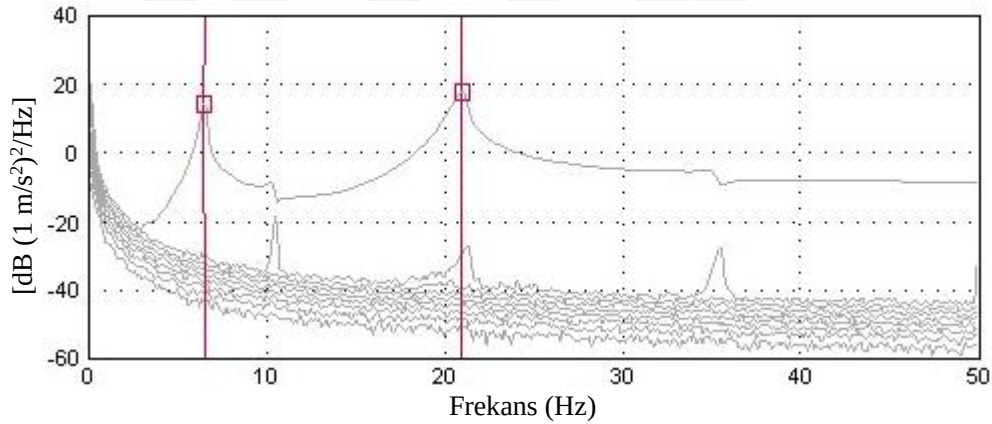
Bu tez çalışmasında yapılan her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında ÇTY ile frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları deneysel olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneylerinin ilk aşamasında üretilen Referans betonarme deney numunesinin başlangıç (hasarsız) dinamik karakteristikleri ÇTY ile belirlenmiştir. Bu ölçümler ilave kat kütleleri yüklendiği ve yüklenmediği her iki durum için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Referans numune, çarpışma etkileri dikkate alınmadan artımlı bir şekilde yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında numuneye ait dinamik karakteristikler tanımlanmıştır. %100 Parkfield depreminin ardından alınan ölçüme ek olarak hasarlı durumdaki yapıdan ilave kat kütleleri indirilerek titreşim testleri tekrarlanmıştır. Böylece Referans deney sırasında 8 adet çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiş ve artan hasarla birlikte dinamik karakteristiklerdeki değişimler takip edilmiştir. Daha sonra farklı çarpışma türleri altında komşu binalar arasındaki etkileşim dikkate alınarak sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında gerçekleştirilen titreşim testlerinde de Referans deneye benzer prosedür takip edilmiş ve her bir çarpışma türü için 8 adet çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenerek yapısal elemanlarda oluşan hasarların çarpışmadan ne ölçüde etkilendiği ve çarpışmanın yapısal davranışa olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

Titreşim testleri sırasında, toplamda 16 farklı noktadan (her bir kolonun potansiyel plastik mafsal bölgeleri (0.5h), ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgeleri) ölçüm alınmıştır. Ölçümlerde B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ve B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesindeki bazı kanalların arızalı olmasından dolayı ölçümler referans ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler vasıtasıyla elde edilen titreşim verileri veri toplama ünitesi aracılığıyla birleştirilerek PULSE yazılımına aktarılmıştır. Bu veriler OMA programına aktararak deney numunelerine ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Laboratuvar koşullarında üretilen deney numunelerini titreştirecek çevresel etkilerin olmaması nedeniyle plastik tokmak yardımıyla yapı titreştirilmiştir. Bu etkinin değeri ölçülemediği için doğal bir etki olarak kullanılmıştır. Her bir çevresel titreşim testinde frekans aralığı 0-100Hz seçilmiştir. Titreşim testlerinde kullanılan cihazlara ve ivmeölçer yerleşim planına ait detaylar Bölüm 2.5.4'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Deney numunelerine ait dinamik karakteristiklerin

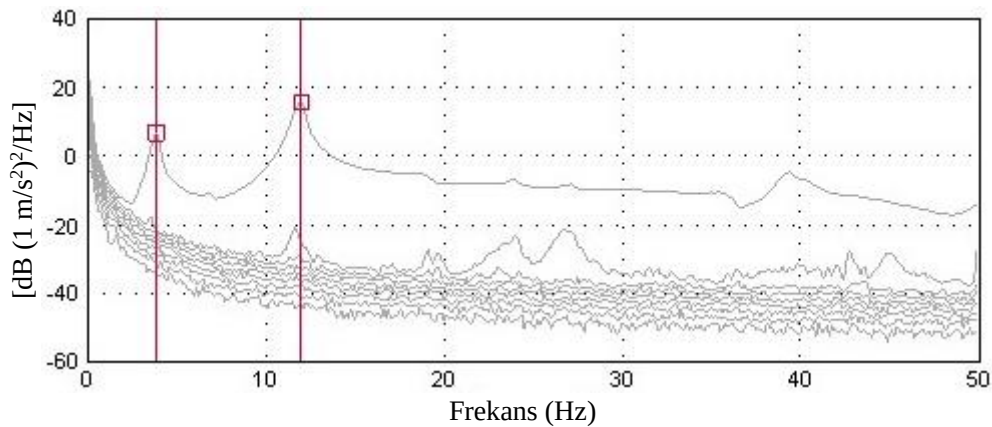
elde edilmesinde Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemi kullanılmıştır. GFOA yönteminde, OMA programında oluşturulan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerlerindeki (SYMTD) pikler seçilerek frekans, mod şekli ve sönüm oranları elde edilmektedir. 2 katlı düzlem çerçeve deney numunelerinin kullanılması nedeniyle dinamik karakteristikler ilk iki mod için elde edilmiştir.

3.5.1. Referans Deney

Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen SYMTD grafikleri ve bu grafikteki piklerin seçilmesiyle elde edilen her bir yapısal moda ait frekans değerleri Şekil 3.36'da sunulmaktadır.



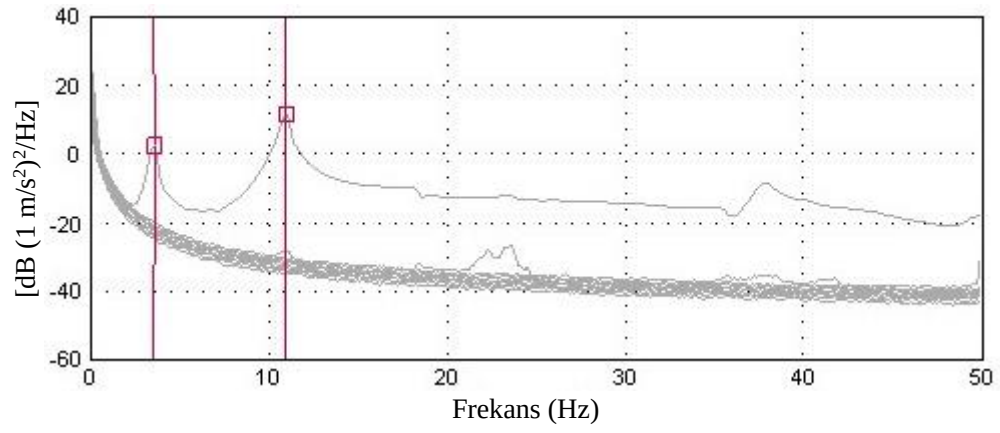
a. Hasarsız-yüksüz durum



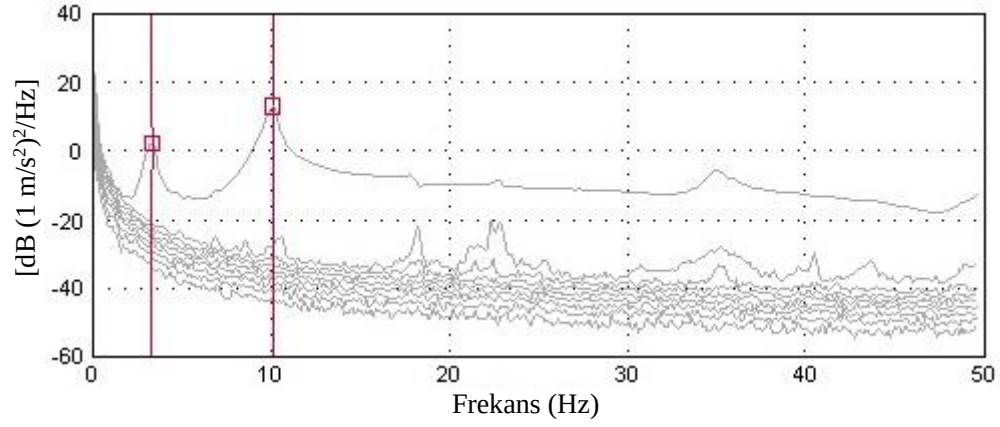
b. Hasarsız-yüklü durum

Şekil 3.36. Referans deneyde elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

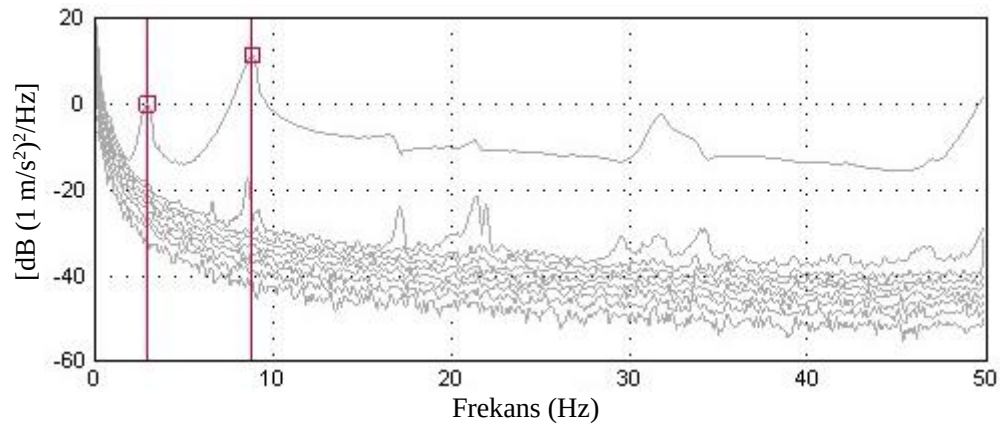
Şekil 3.36'nın devamı,



c. %25 Erzincan depremi sonrası

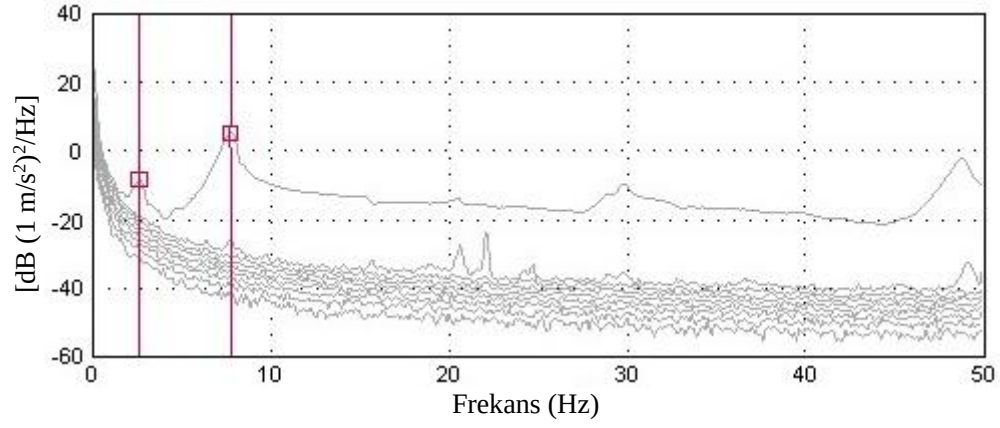


d. %50 Erzincan depremi sonrası

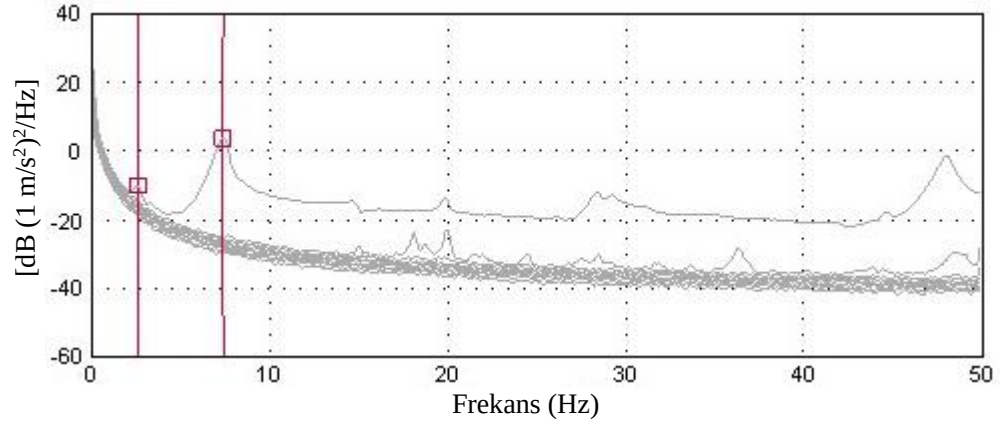


e. %75 Erzincan depremi sonrası

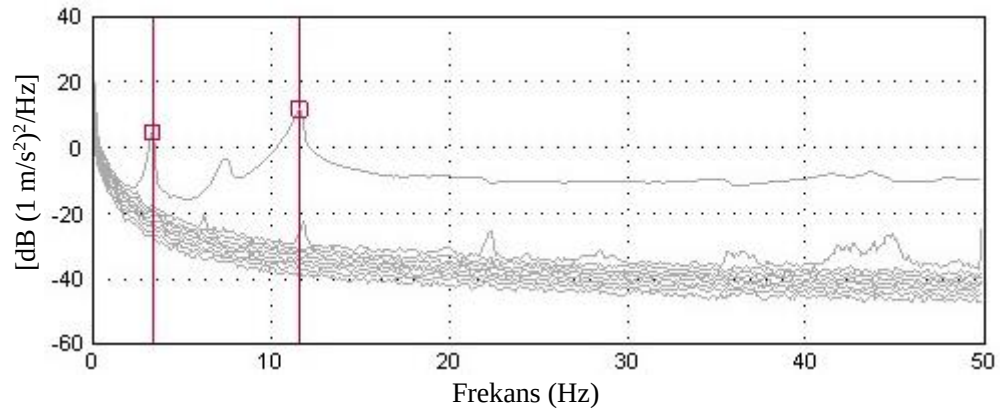
Şekil 3.36'nın devamı,



f. %100 Erzincan depremi sonrası



g. %100 Parkfield depremi sonrası



h. Hasarlı-yüksüz durum

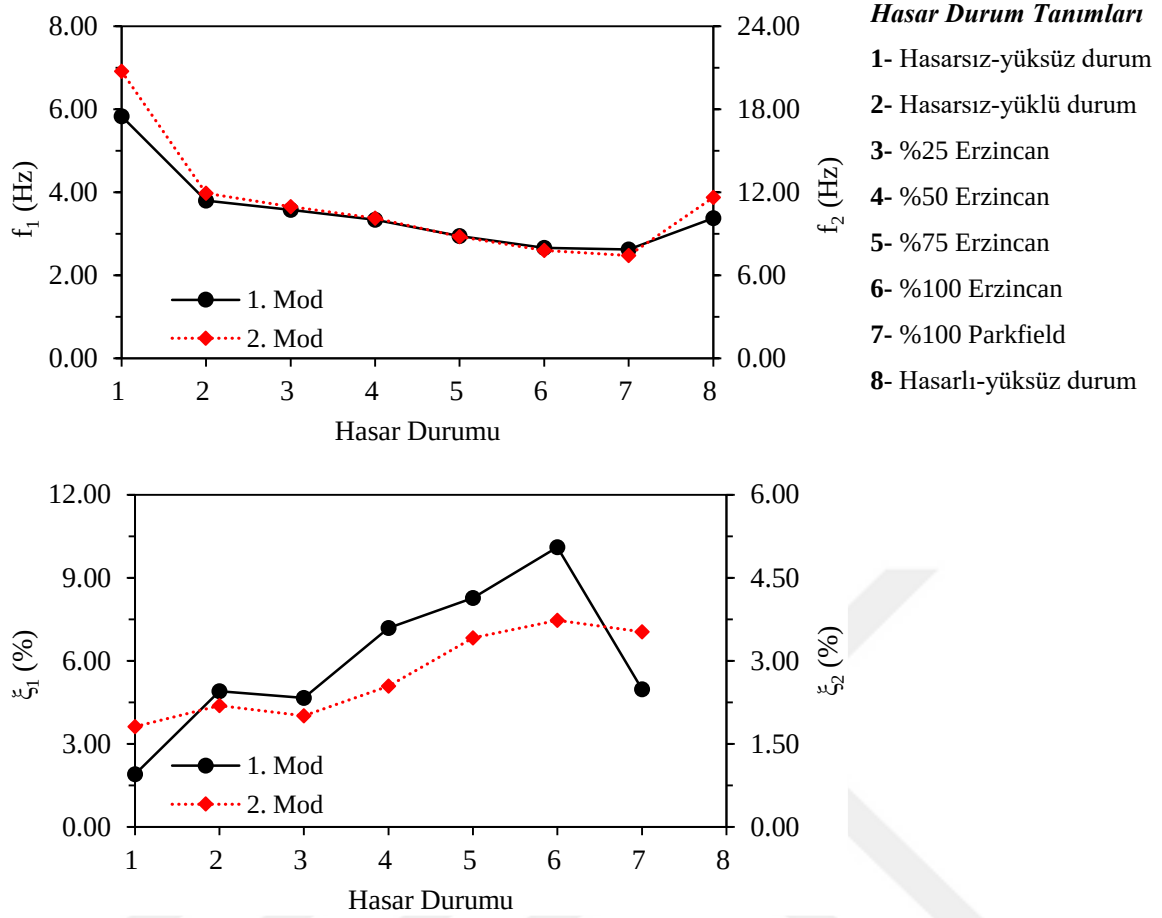
GFOA yöntemi ile Referans deneyde her bir adım için elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 3.7'de sunulmuştur. Tablo 3.7'den görüleceği üzere ilk iki moda ait

frekans değerleri, hasarsız yüksüz durum için 5.83Hz-20.75Hz, hasarsız yüklü durum için 3.80Hz-11.70Hz, %25 Erzincan depremi sonrası 3.57Hz-10.95Hz, %50 Erzincan depremi sonrası 3.34Hz-10.12Hz, %75 Erzincan sonrası 2.94Hz-8.78Hz, %100 Erzincan depremi sonrası 2.66Hz-7.80Hz ve %100 Parkfield depremi sonrası 2.62Hz-7.43Hz olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında ilave kat ağırlıklarının indirildiği durumda alınan ölçümlerde bu frekanslar 3.38Hz-11.63Hz olarak elde edilmiştir. Her bir moda karşılık gelen sönüm oranları ise %1.813 ve %10.100 arasında değişmektedir.

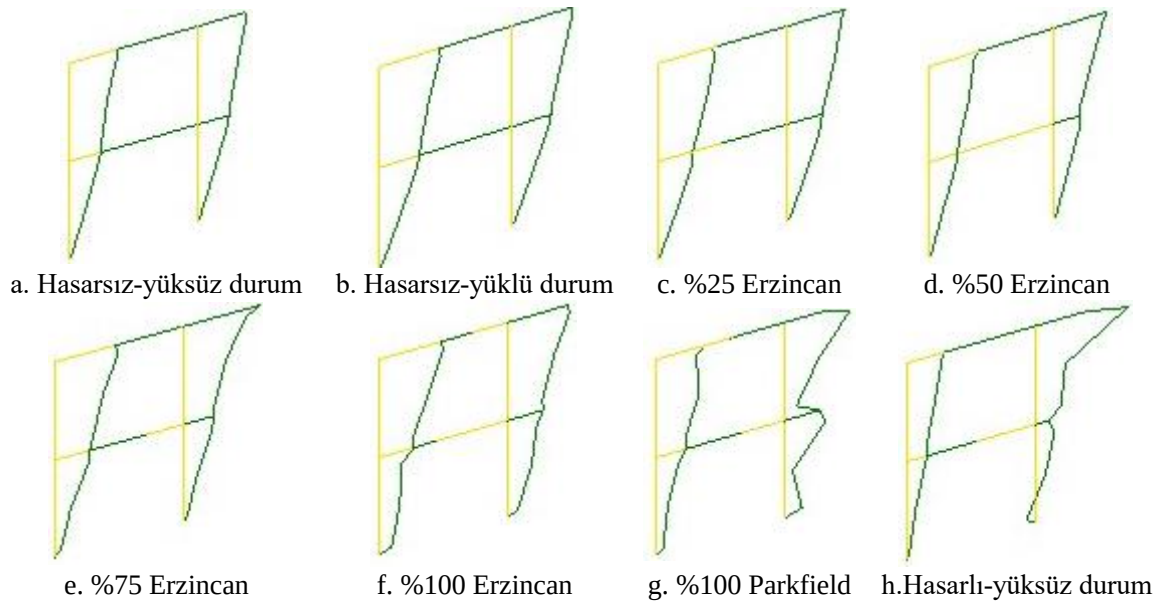
Tablo 3.7. Referans deneyde elde edilen frekans ve sönüm oranları

Ölçüm Durumu	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	1. Mod	2. Mod	1. Mod	2. Mod
Hasarsız-yüksüz durum	5.83	20.75	1.902	1.813
Hasarsız-yüklü durum	3.80	11.70	4.902	2.194
%25 Erzincan depremi sonrası	3.57	10.95	4.656	2.007
%50 Erzincan depremi sonrası	3.34	10.12	7.189	2.545
%75 Erzincan depremi sonrası	2.94	8.78	8.270	3.412
%100 Erzincan depremi sonrası	2.66	7.80	10.100	3.731
%100 Parkfield depremi sonrası	2.62	7.43	4.972	3.526
Hasarlı-yüksüz durum	3.38	11.63	-	-

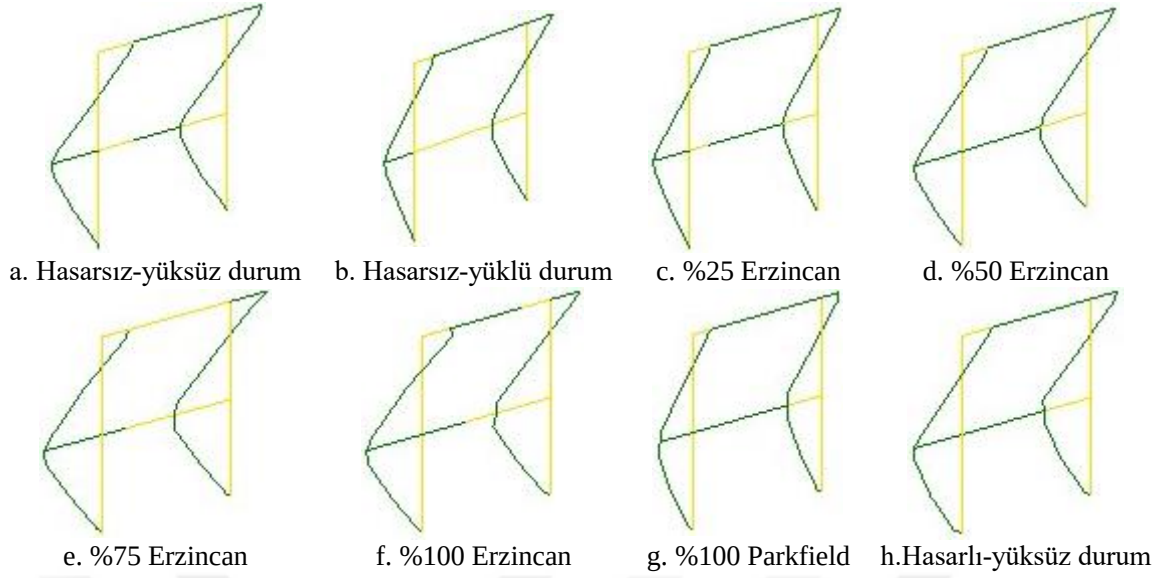
Çevresel titreşim testleri ile elde edilen frekans ve sönüm oranlarının, gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarla birlikte değişimi Şekil 3.37’de sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde sarsma masasına uygulanan yük düzeyinin artması ile birlikte frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasarsız-yüklü durumda elde edilen frekans değerleri referans alındığında ilk iki frekanstaki azalmalar %25 Erzincan depremi sonrası %5.97-%6.41, %50 Erzincan depremi sonrası %12.08-%13.50, %75 Erzincan sonrası %22.58-%24.97, %100 Erzincan depremi sonrası %29.97-%33.37 ve %100 Parkfield depremi sonrası %31.05-%36.54 olarak elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız-yüksüz durum ile sarsma masası deneyleri sonrası ilave kat kütlelerinin indirildiği durumda elde edilen ilk iki moda ait frekans değerlerinin %42.11-%43.95 azaldığı tespit edilmiştir. Artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin de artma eğilimi gösterdiği ve bu değerlerde frekans değerlerine kıyasla daha büyük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Referans deneyde numunenin ilk iki mod şekli Şekil 3.38 ve Şekil 3.39’da her bir hasar durumu için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar seviyesinin artmasıyla birlikte mod şekillerinde de önemli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.37. Referans deneyde elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi



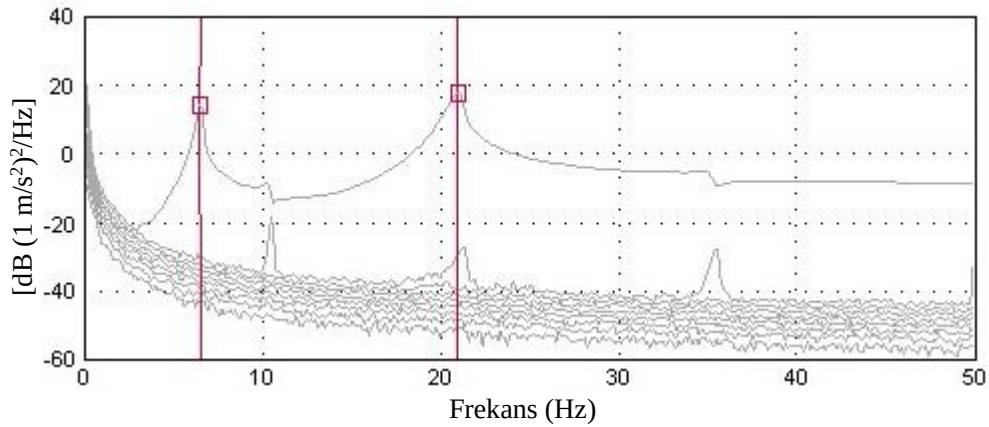
Şekil 3.38. Referans deneyde elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi



Şekil 3.39. Referans deneyde elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi

3.5.2. Deney-1 (Kat Yükseklikleri Farklı Binaların Çarpışması)

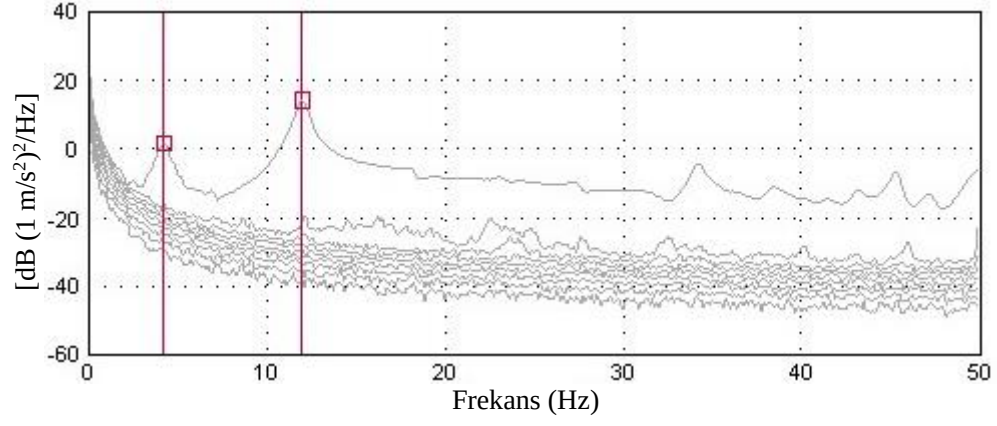
Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneyde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen SYMTD grafikleri ve bu grafikteki piklerin seçilmesiyle elde edilen her bir yapısal moda ait frekans değerleri Şekil 3.40’da sunulmaktadır.



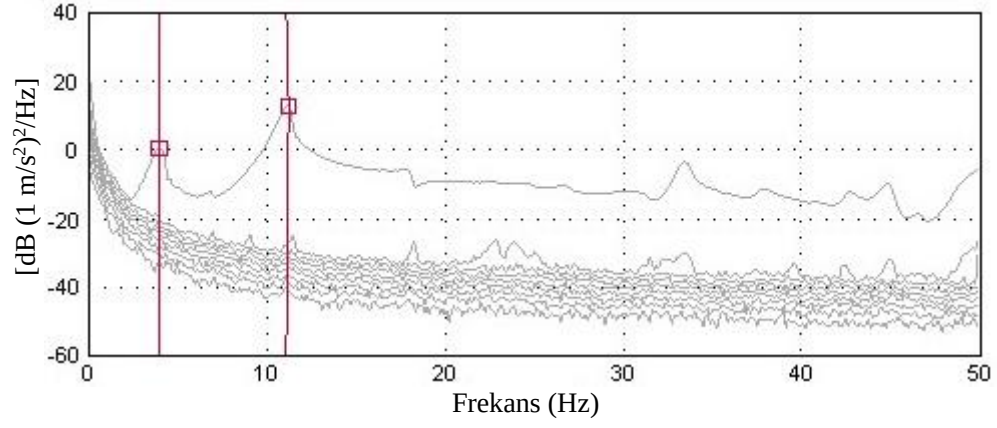
a. Hasarsız-yüksüz durum

Şekil 3.40. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1’de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

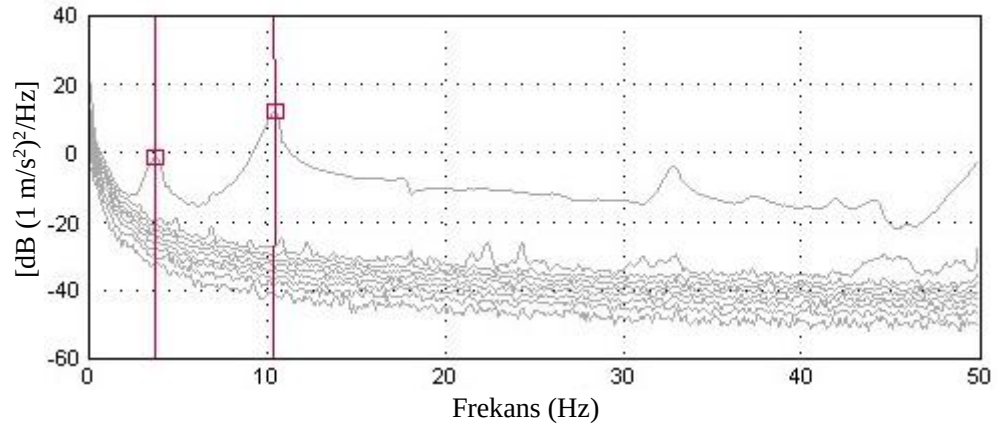
Şekil 3.40'ın devamı,



b. Hasarsız-yüklü durum

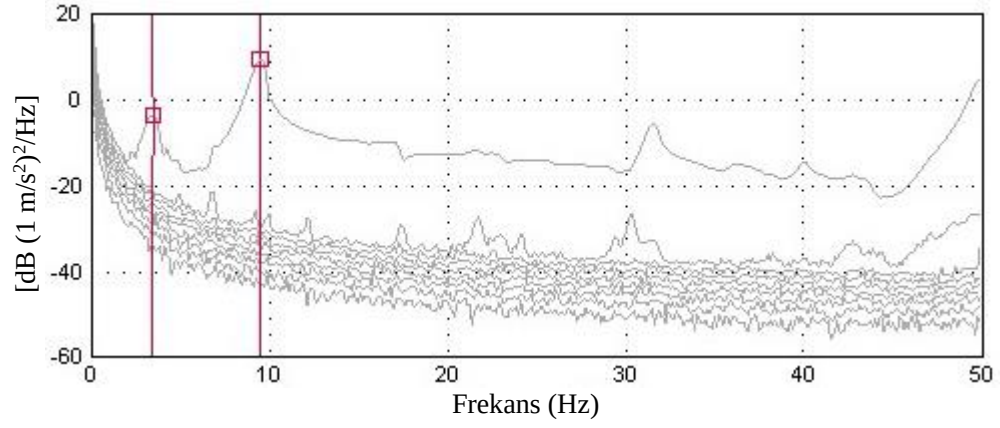


c. %25 Erzincan depremi sonrası

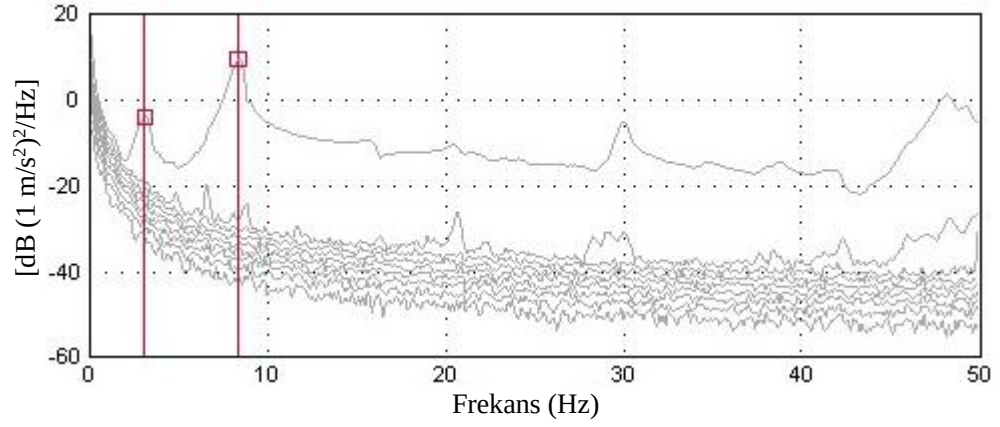


d. %50 Erzincan depremi sonrası

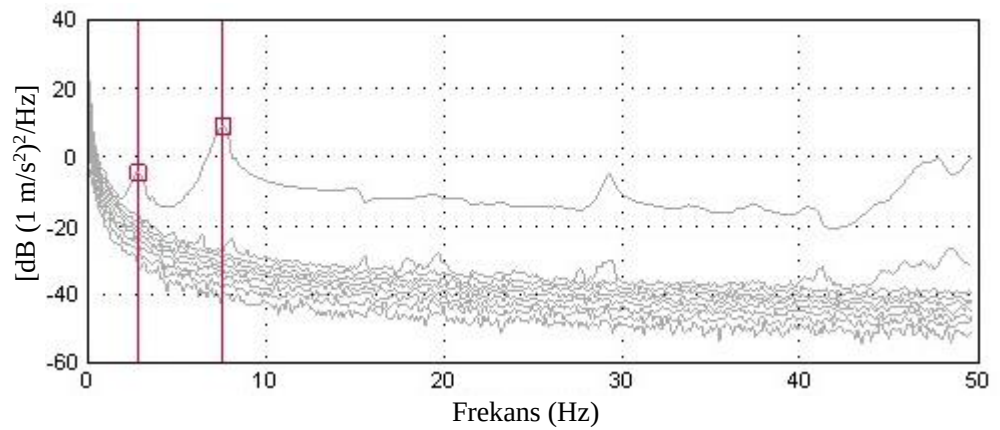
Şekil 3.40'ın devamı,



e. %75 Erzincan depremi sonrası

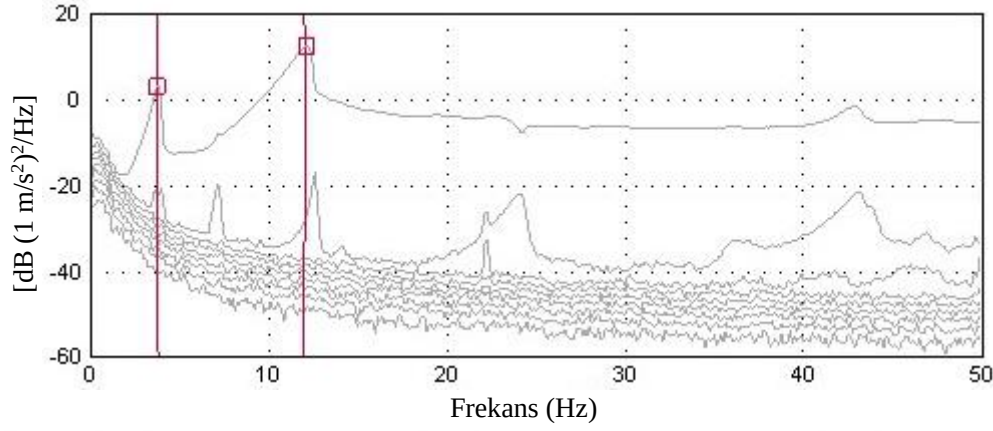


f. %100 Erzincan depremi sonrası



g. %100 Parkfield depremi sonrası

Şekil 3.40'ın devamı,



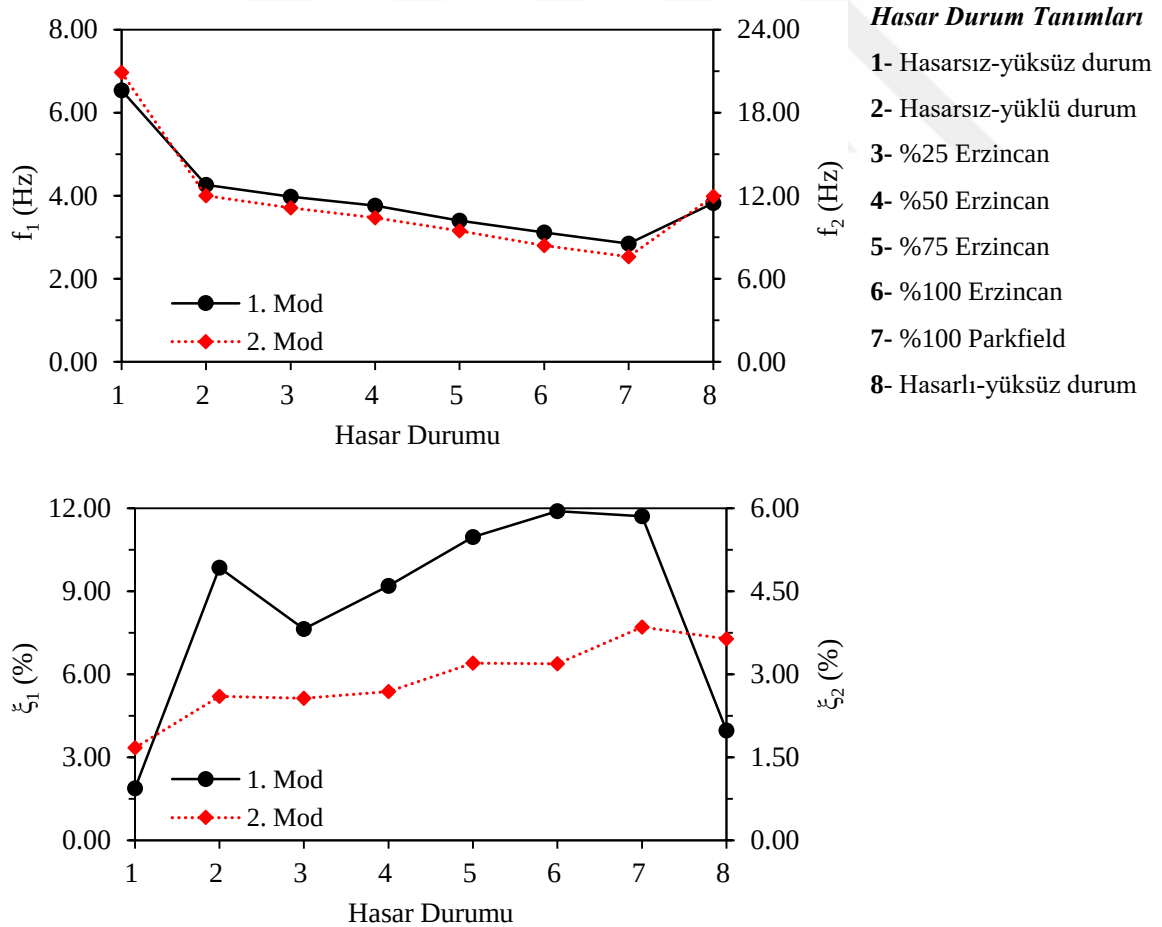
h. Hasarlı-yüksüz durum

GFOA yöntemi ile kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği deneyde her bir adım için elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 3.8’de sunulmuştur. İlk iki moda ait frekans değerleri, hasarsız yüksüz durum için 6.54Hz-20.91Hz, hasarsız yüklü durum için 4.26Hz-11.99Hz, %25 Erzincan depremi sonrası 3.98Hz-11.11Hz, %50 Erzincan depremi sonrası 3.76Hz-10.41Hz, %75 Erzincan sonrası 3.40Hz-9.46Hz, %100 Erzincan depremi sonrası 3.12Hz-8.39Hz ve %100 Parkfield depremi sonrası 2.84Hz-7.60Hz olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında ilave kat ağırlıklarının indirildiği durumda alınan ölçümlerde bu frekanslar 3.82Hz-11.96Hz olarak elde edilmiştir. Her bir moda karşılık gelen sönüm oranları ise %1.673 ve %11.890 arasında değişmektedir.

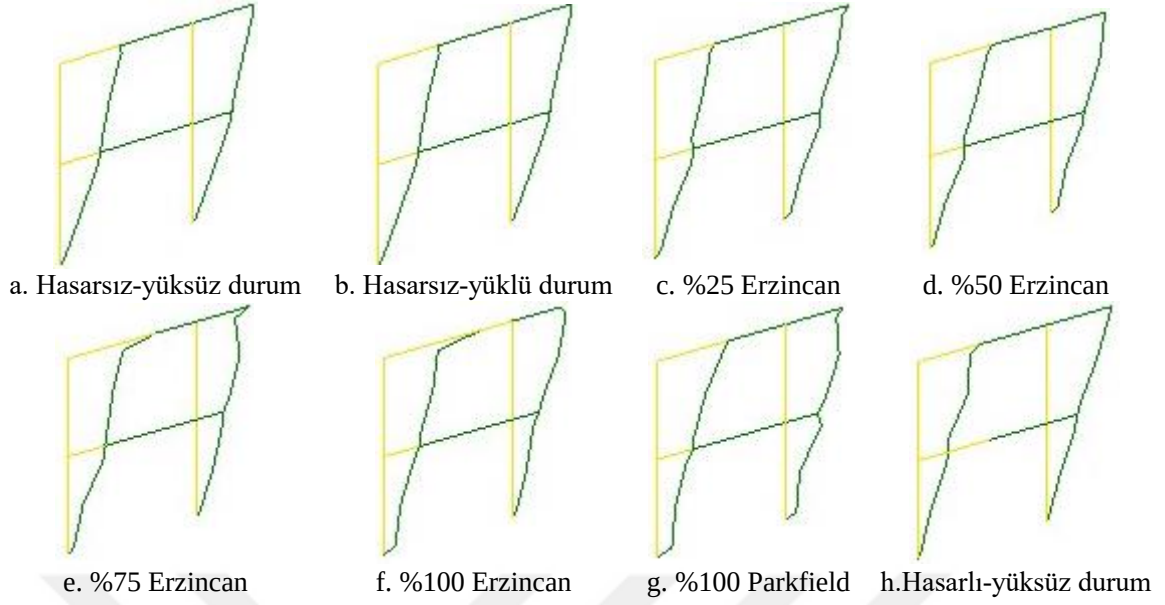
Tablo 3.8. Deney-1’de elde edilen frekans ve sönüm oranları

Ölçüm Durumu	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	1. Mod	2. Mod	1. Mod	2. Mod
Hasarsız-yüksüz durum	6.54	20.91	1.875	1.673
Hasarsız-yüklü durum	4.26	11.99	9.856	2.600
%25 Erzincan depremi sonrası	3.98	11.11	7.640	2.569
%50 Erzincan depremi sonrası	3.76	10.41	9.196	2.685
%75 Erzincan depremi sonrası	3.40	9.46	10.960	3.202
%100 Erzincan depremi sonrası	3.12	8.39	11.890	3.192
%100 Parkfield depremi sonrası	2.84	7.60	11.710	3.854
Hasarlı-yüksüz durum	3.82	11.96	3.965	3.642

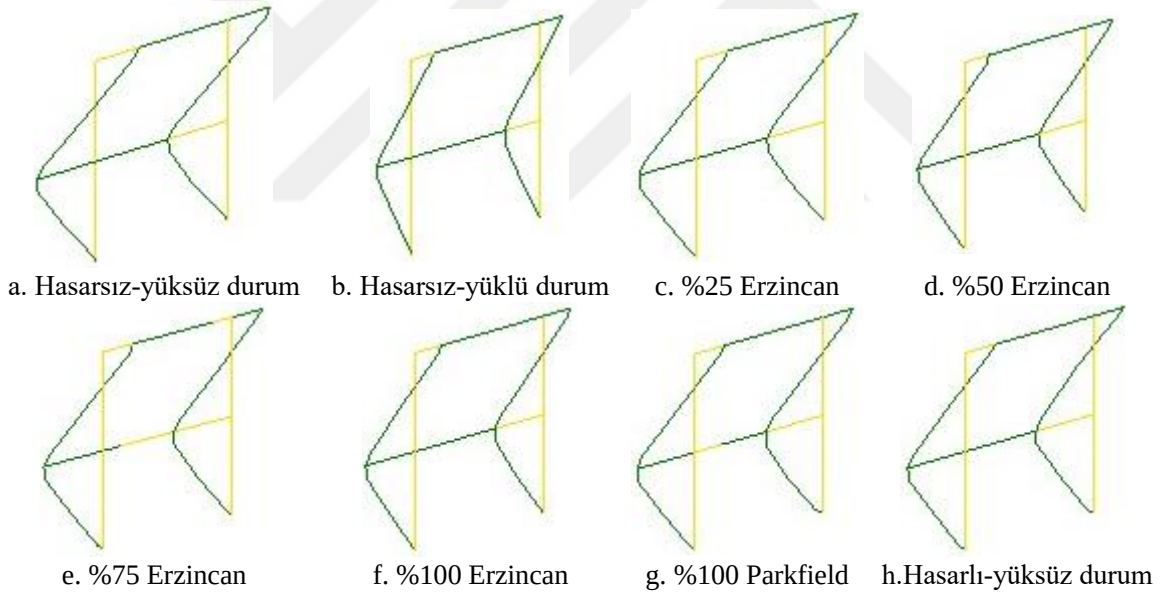
Frekans ve sönüm oranlarının hasarla birlikte değişimini Şekil 3.41’de sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde sarsma masasına uygulanan yük düzeyinin artması ile birlikte frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasarsız-yüklü durumda elde edilen frekans değerleri referans alındığında ilk iki frekanstaki azalmalar %25 Erzincan depremi sonrası %6.73-%7.34, %50 Erzincan depremi sonrası %11.78-%13.18, %75 Erzincan sonrası %20.20-%21.10, %100 Erzincan depremi sonrası %26.89-%30.03 ve %100 Parkfield depremi sonrası %33.27-%36.64 olarak elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız-yüksüz durum ile sarsma masası deneyleri sonrası ilave kat kütlelerinin indirildiği durumda elde edilen ilk iki moda ait frekans değerlerinin %41.56-%42.80 azaldığı tespit edilmiştir. Artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin de artma eğiliminin olduğu görülmektedir. Kolon-döşeme etkileşiminin araştırıldığı numunenin ilk iki mod şekilleri Şekil 3.42 ve Şekil 3.43’te her bir hasar durumu için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar seviyesinin artmasıyla birlikte mod şekillerinde de önemli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.41. Deney-1’de elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi



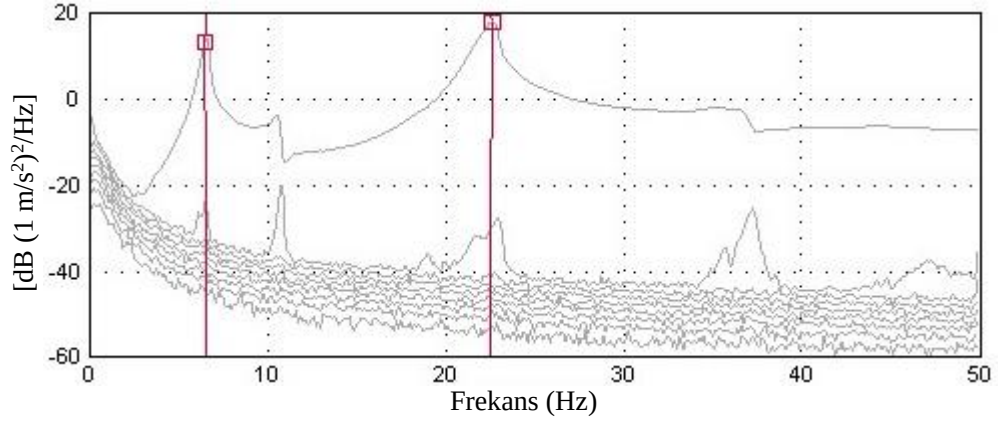
Şekil 3.42. Deney-1’de elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi



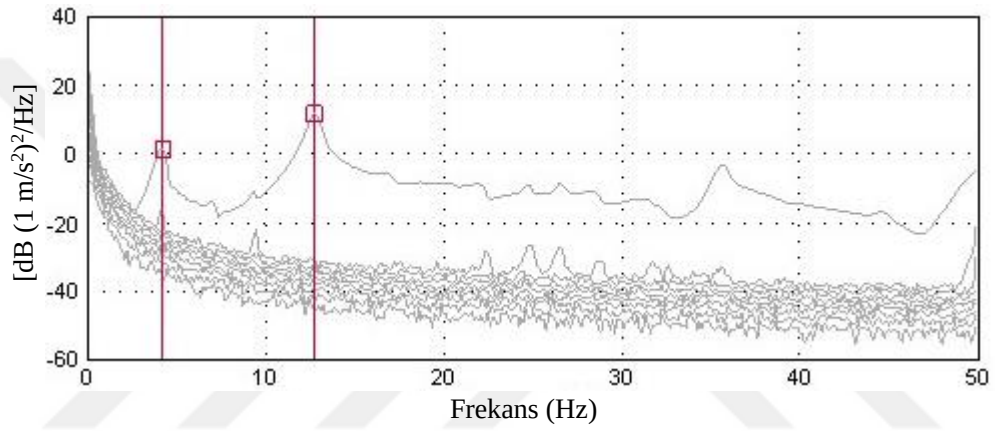
Şekil 3.43. Deney-1’de elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi

3.5.3. Deney-2 (Farklı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması)

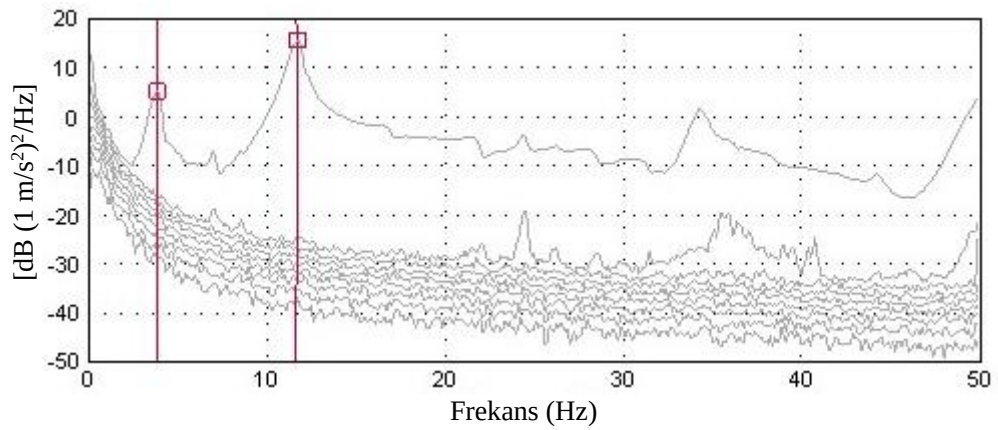
Deney-2’de gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden elde edilen SYMTD grafikleri ve her bir yapısal moda ait frekans değerleri Şekil 3.44’de sunulmaktadır.



a. Hasarsız-yüksüz durum



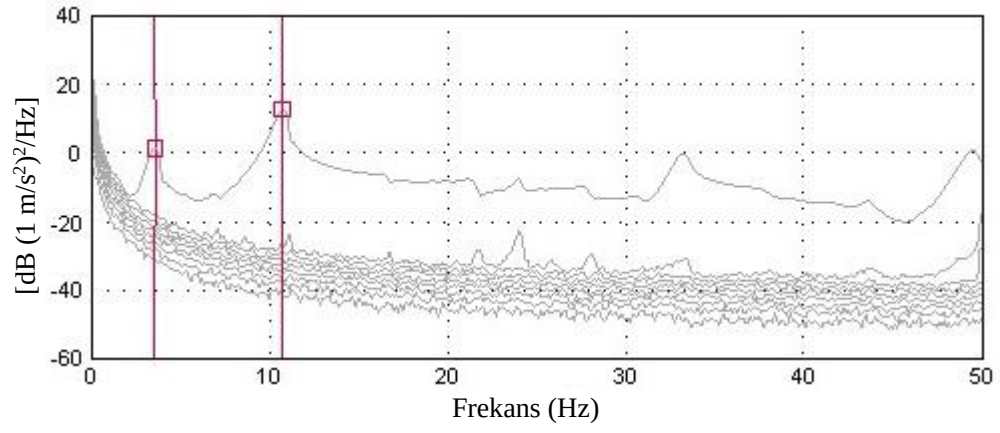
b. Hasarsız-yüklü durum



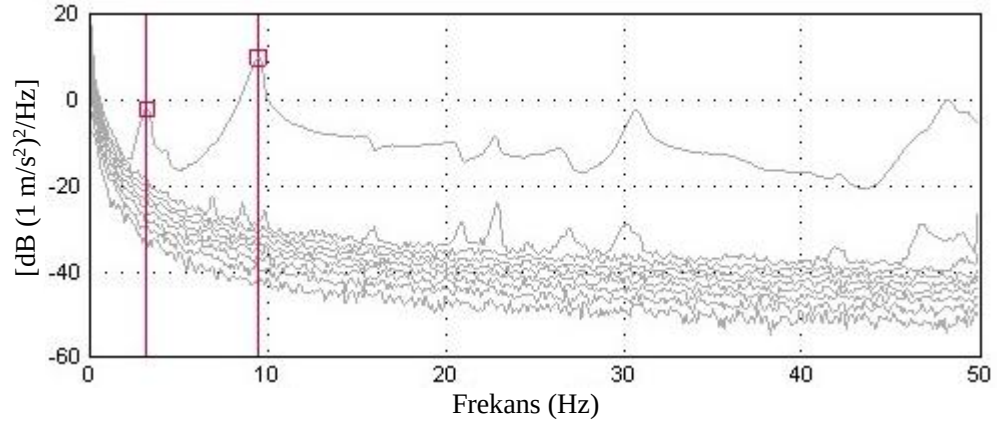
c. %25 Erzincan depremi sonrası

Şekil 3.44. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2’de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

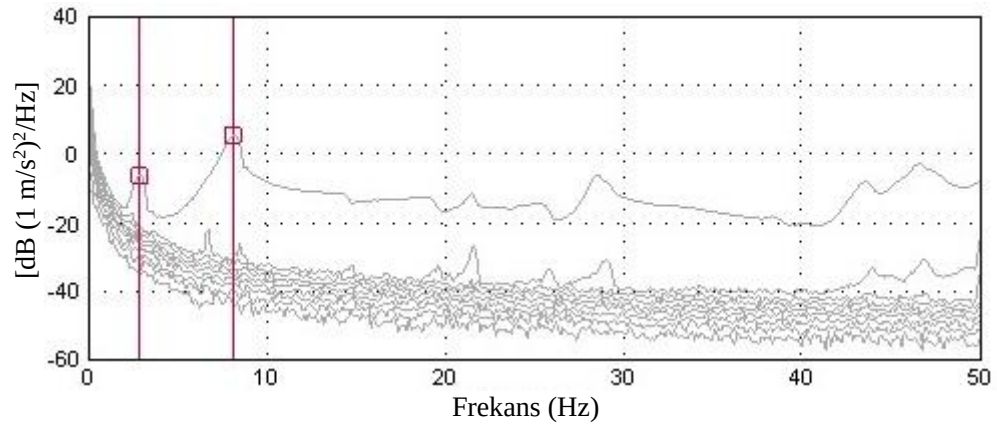
Şekil 3.44'ün devamı,



d. %50 Erzincan depremi sonrası

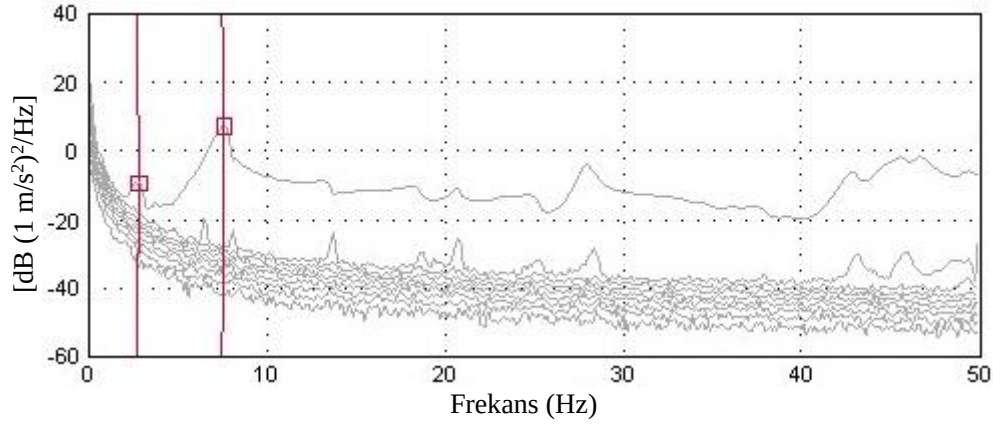


e. %75 Erzincan depremi sonrası

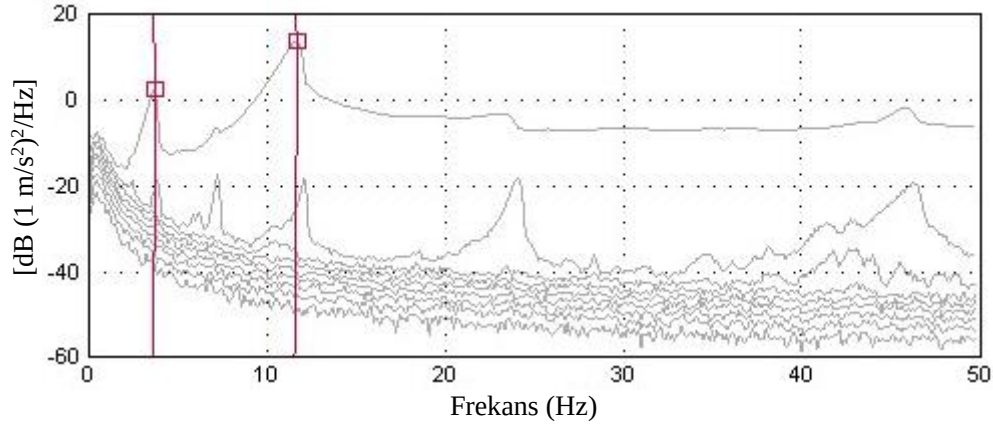


f. %100 Erzincan depremi sonrası

Şekil 3.44'ün devamı,



g. %100 Parkfield depremi sonrası



h. Hasarlı-yüksüz durum

Tek katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı bu deneyde GFOA yöntemi ile her bir adım için elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 3.9'da sunulmuştur. İlk iki moda ait frekans değerleri, hasarsız yüksüz durum için 6.58Hz-22.51Hz, hasarsız yüklü durum için 4.21Hz-12.78Hz, %25 Erzincan depremi sonrası 3.84Hz-11.67Hz, %50 Erzincan depremi sonrası 3.55Hz-10.72Hz, %75 Erzincan sonrası 3.21Hz-9.45Hz, %100 Erzincan depremi sonrası 2.89Hz-8.11Hz ve %100 Parkfield depremi sonrası 2.71Hz-7.52Hz olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında ilave kat ağırlıklarının indirildiği durumda alınan ölçümlerde bu frekanslar 3.68Hz-11.57Hz olarak elde edilmiştir.

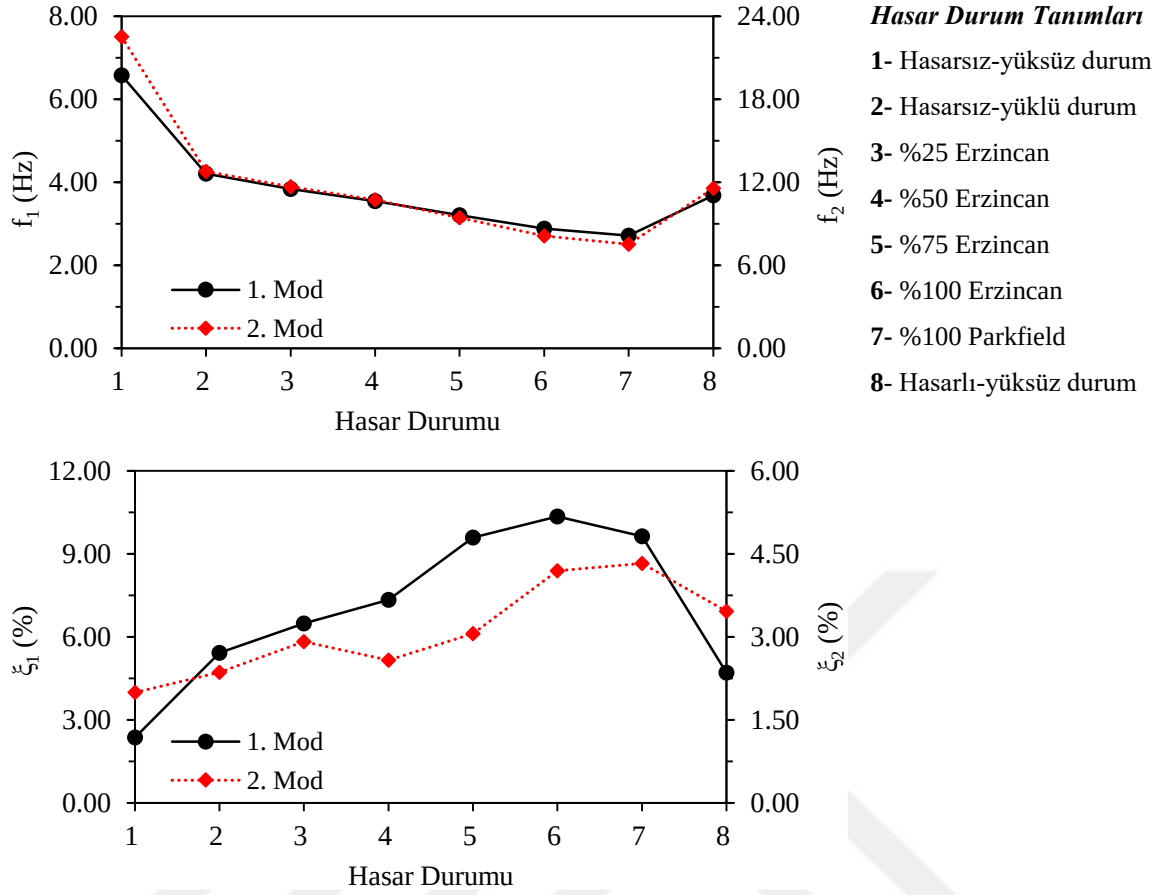
İlk iki moda ait sönüm oranları ise artan hasar ile birlikte çoğu durumda artış göstermiştir. Sönüm oranları, hasarsız yüksüz durum için %2.365-%1.993, hasarsız yüklü durum için %5.426-%2.358, %25 Erzincan depremi sonrası %6.487-%2.914, %50 Erzincan

depremi sonrası %7.339-%2.576, %75 Erzincan sonrası %9.589-%3.055, %100 Erzincan depremi sonrası %10.350-%4.193 ve %100 Parkfield depremi sonrası %9.636-%4.323, deneyler sonunda yükün kaldırıldığı durumda %4.704-%3.460 olarak elde edilmiştir.

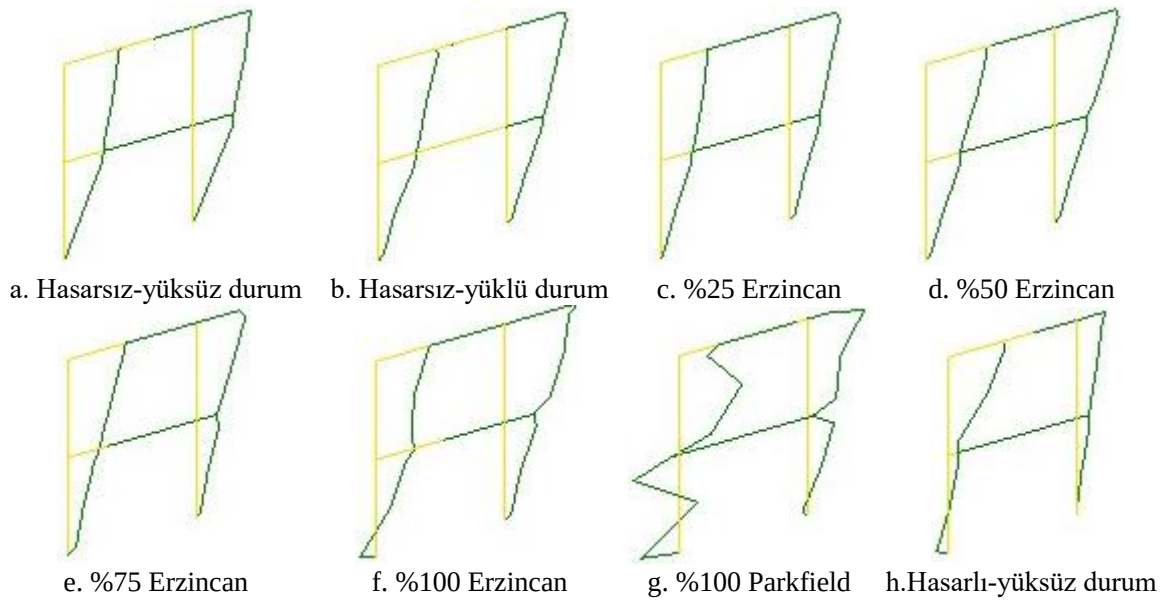
Tablo 3.9. Deney-2’de elde edilen frekans ve sönüm oranları

Ölçüm Durumu	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	1. Mod	2. Mod	1. Mod	2. Mod
Hasarsız-yüksüz durum	6.58	22.51	2.365	1.993
Hasarsız-yüklü durum	4.21	12.78	5.426	2.358
%25 Erzincan depremi sonrası	3.84	11.67	6.487	2.914
%50 Erzincan depremi sonrası	3.55	10.72	7.339	2.576
%75 Erzincan depremi sonrası	3.21	9.45	9.589	3.055
%100 Erzincan depremi sonrası	2.89	8.11	10.350	4.193
%100 Parkfield depremi sonrası	2.71	7.52	9.636	4.323
Hasarlı-yüksüz durum	3.68	11.57	4.704	3.460

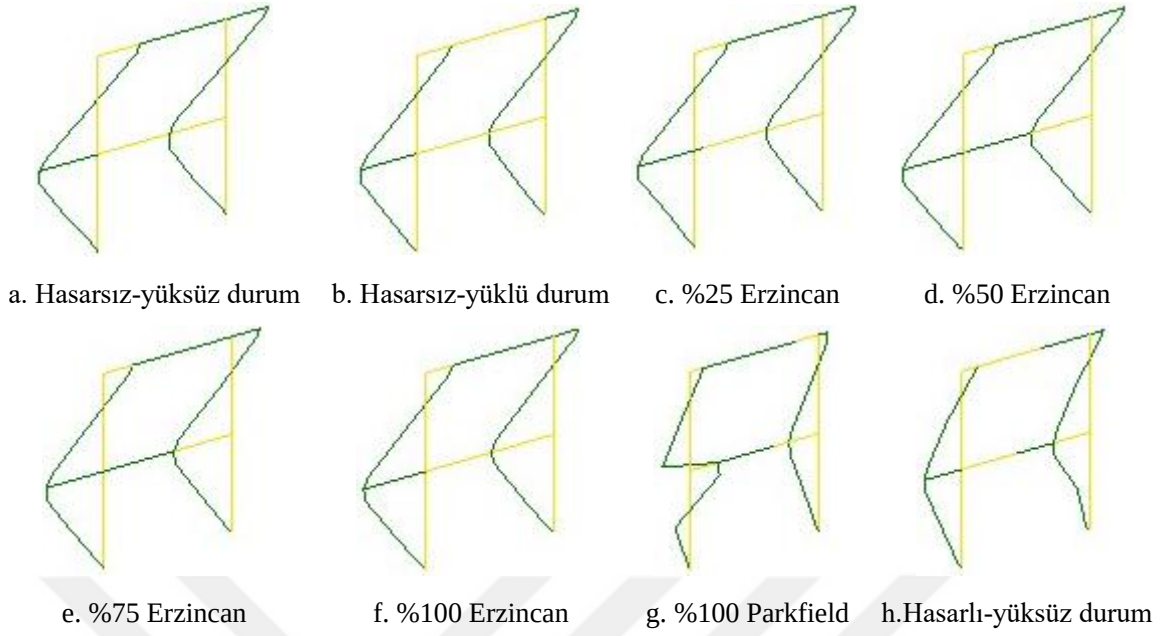
Çevresel titreşim testleri ile elde edilen frekans ve sönüm oranlarının, gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarla birlikte değişimi Şekil 3.45’te sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde sarsma masasına uygulanan yük düzeyinin artması ile birlikte frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasarsız-yüklü durumda elde edilen frekans değerleri referans alındığında ilk iki frekanstaki azalmalar %25 Erzincan depremi sonrası %8.89-%8.69, %50 Erzincan depremi sonrası %15.75-%16.12, %75 Erzincan sonrası %23.83-%26.09, %100 Erzincan depremi sonrası %31.43-%36.51 ve %100 Parkfield depremi sonrası %35.59-%41.20 olarak elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız-yüksüz durum ile sarsma masası deneyleri sonrası ilave kat kütlelerinin indirildiği durumda elde edilen ilk iki moda ait frekans değerleri kıyaslandığında, frekansların %44.03-%48.60 azaldığı tespit edilmiştir. Artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin de artma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği numunenin ilk iki mod şekilleri Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de her bir hasar durumu için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar seviyesinin artmasıyla birlikte mod şekillerinde de önemli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Çarpışmanın tek katta gerçekleşmesi nedeniyle sarsma masası deneyleri sırasında çarpışmanın olduğu yöndeki 2. kat kolonunun alt ucunda önemli hasarların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum mod şekillerine de yansımaktadır.



Şekil 3.45. Deney-2’de elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi



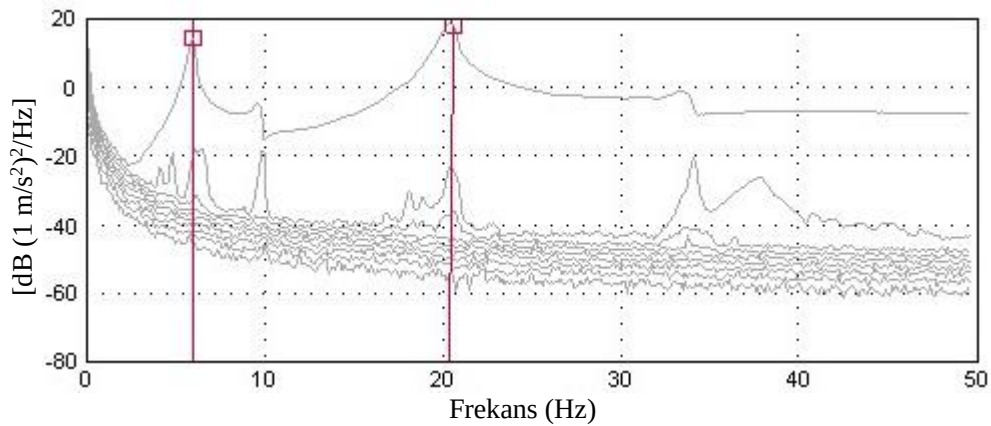
Şekil 3.46. Deney-2’de elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi



Şekil 3.47. Deney-2’de elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi

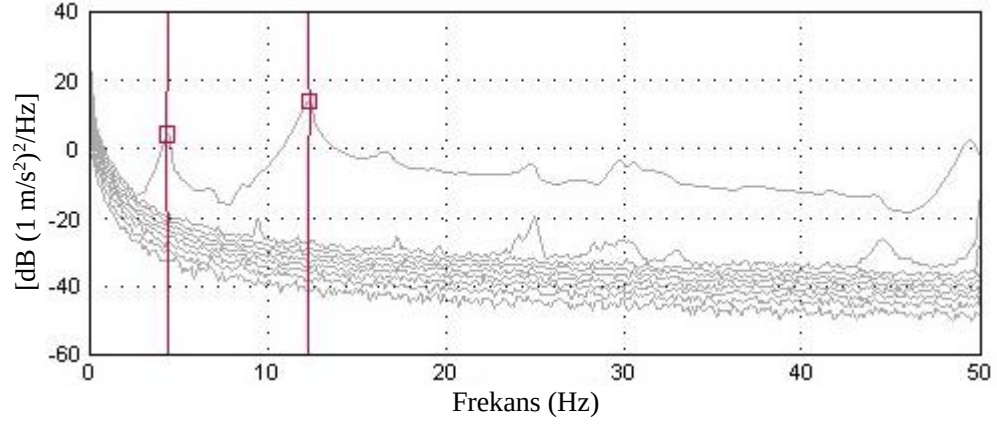
3.5.4. Deney-3 (Aynı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması)

Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin araştırıldığı Deney-3 için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen SYMTD grafikleri ve bu grafikteki piklerin seçilmesiyle elde edilen her bir yapısal moda ait frekans değerleri Şekil 3.48’de sunulmaktadır.

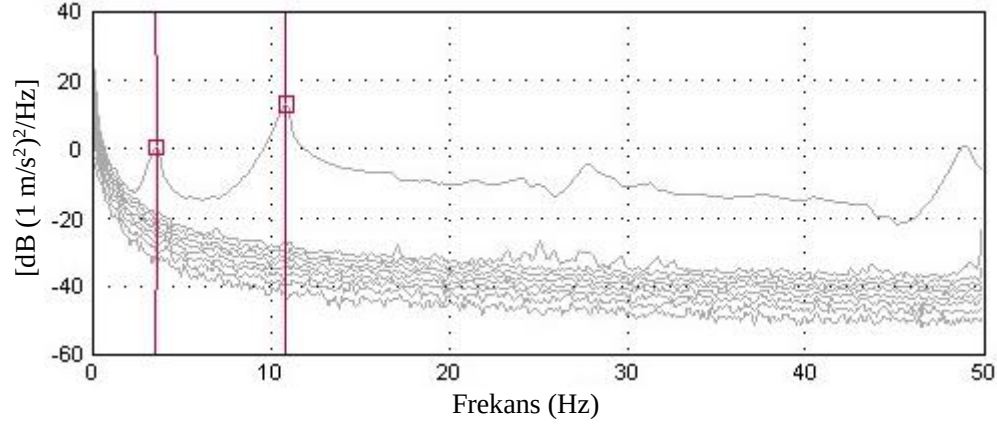


Şekil 3.48. Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3’de elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

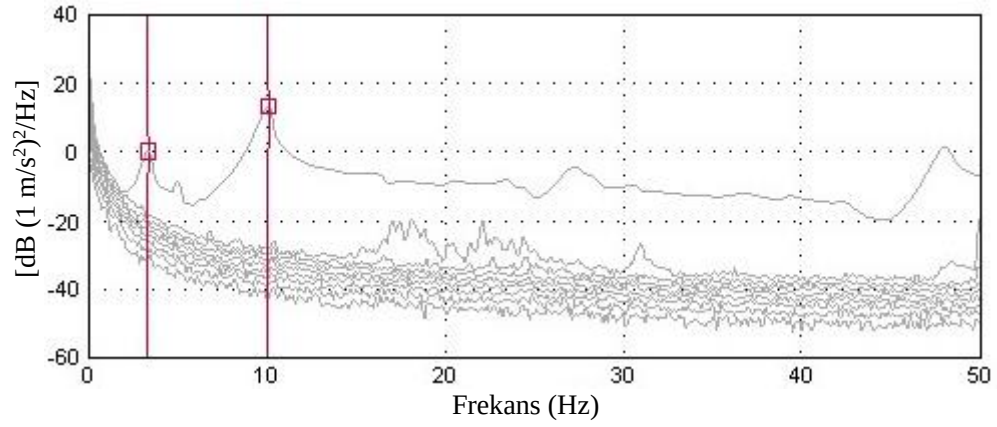
Şekil 3.48'in devamı,



b. Hasarsız-yüklü durum

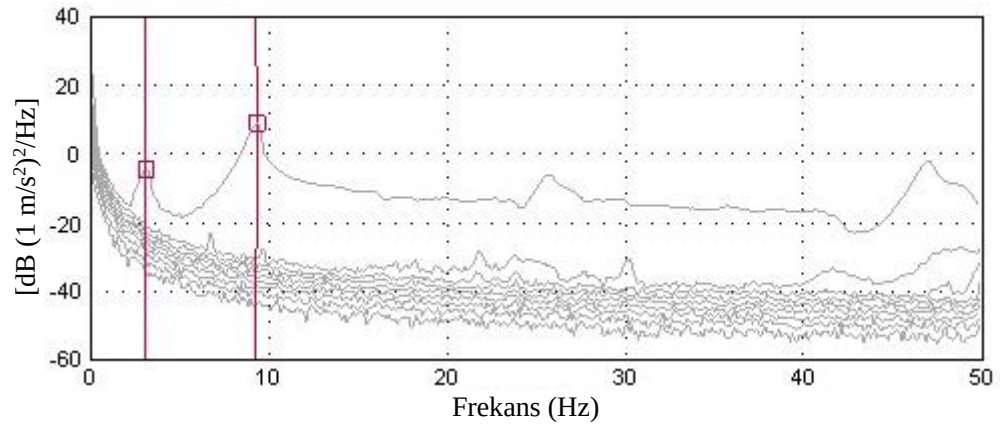


c. %25 Erzincan depremi sonrası

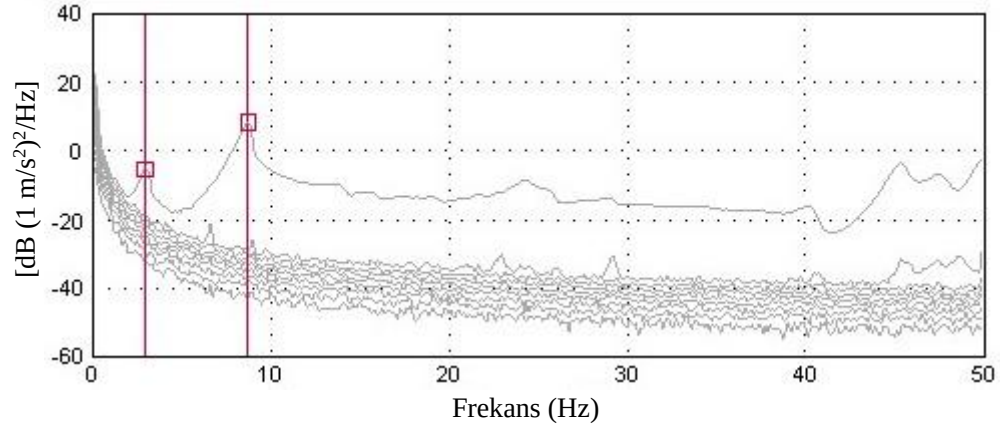


d. %50 Erzincan depremi sonrası

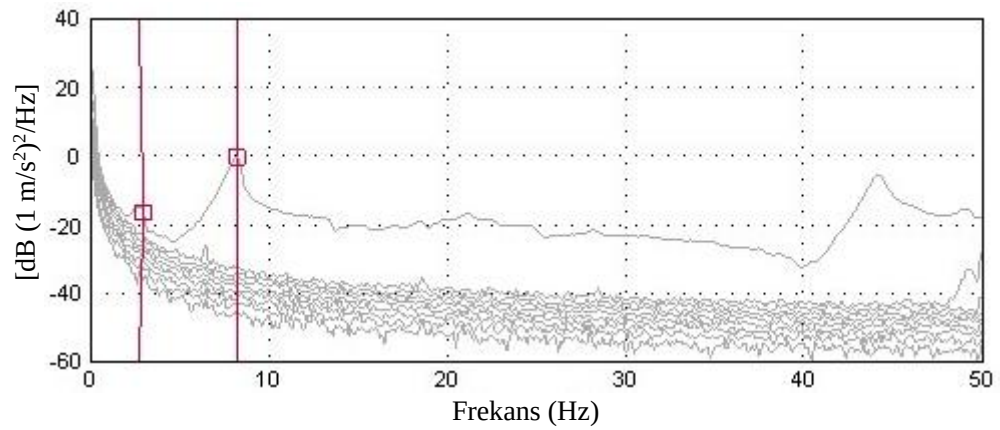
Şekil 3.48'in devamı,



e. %75 Erzincan depremi sonrası

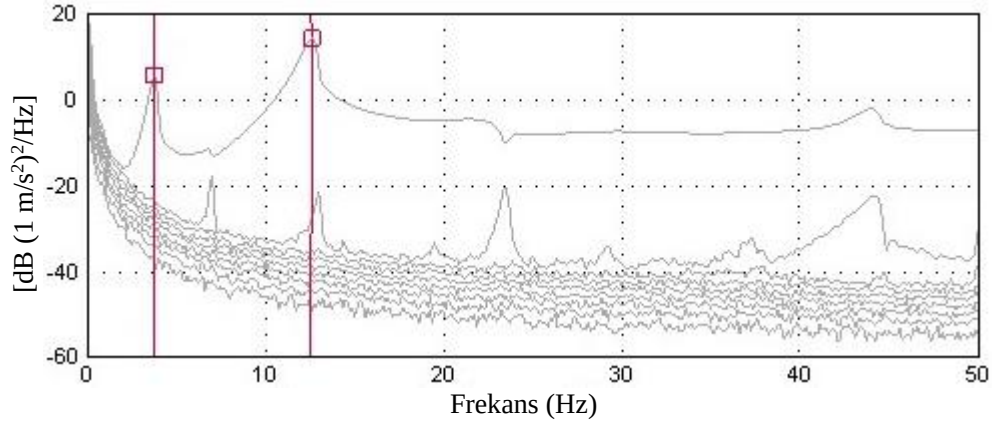


f. %100 Erzincan depremi sonrası



g. %100 Parkfield depremi sonrası

Şekil 3.48'in devamı,



h. Hasarlı-yüksüz durum

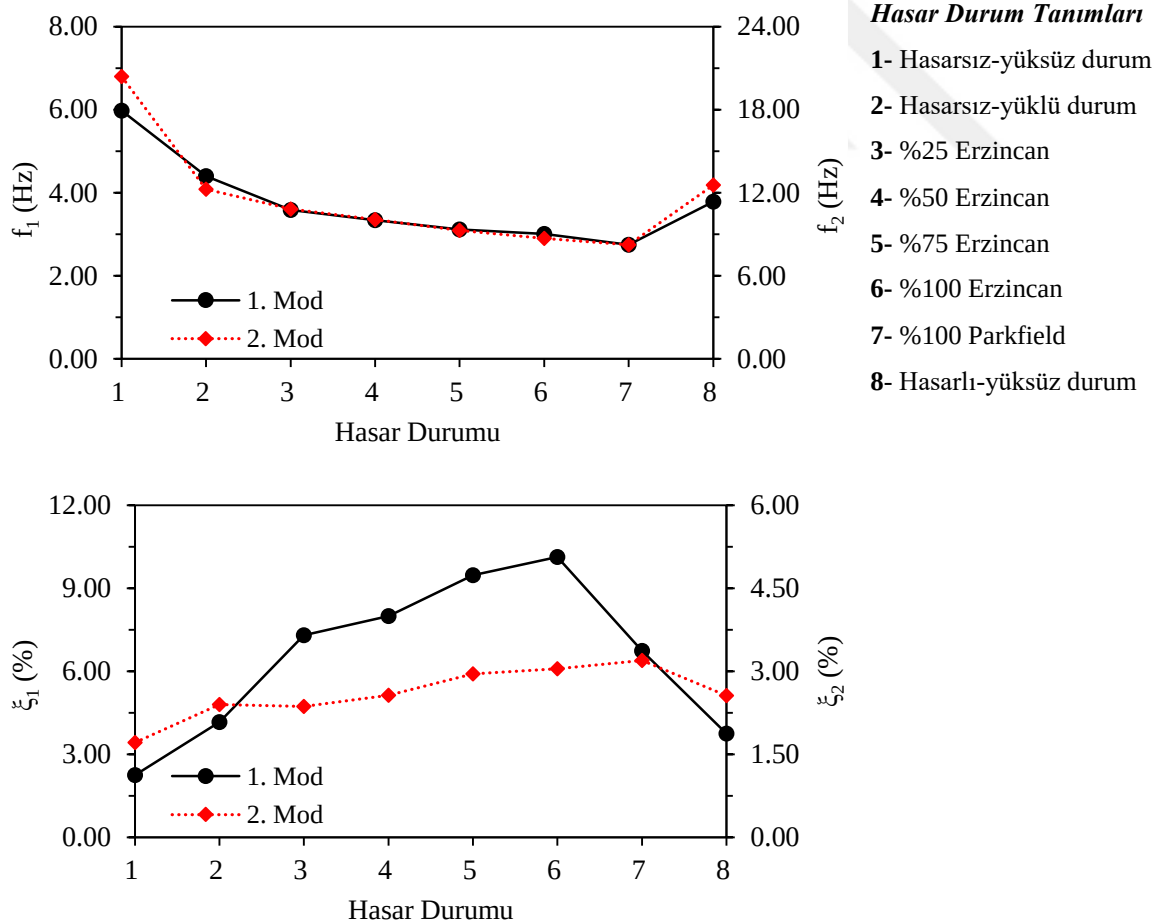
GFOA yöntemi ile her bir adım için elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 3.10'da sunulmuştur. İlk iki moda ait frekans değerleri, hasarsız yüksüz durum için 5.97Hz-20.39Hz, hasarsız yüklü durum için 4.40Hz-12.26Hz, %25 Erzincan depremi sonrası 3.58Hz-10.82Hz, %50 Erzincan depremi sonrası 3.34Hz-10.05Hz, %75 Erzincan sonrası 3.11Hz-9.28Hz, %100 Erzincan depremi sonrası 3.01Hz-8.70Hz ve %100 Parkfield depremi sonrası 2.75Hz-8.23Hz olarak elde edilmiştir. Her bir moda karşılık gelen sönüm oranları ise %1.714 ve %10.130 arasında değişmektedir.

Tablo 3.10. Deney-3'te elde edilen frekans ve sönüm oranları

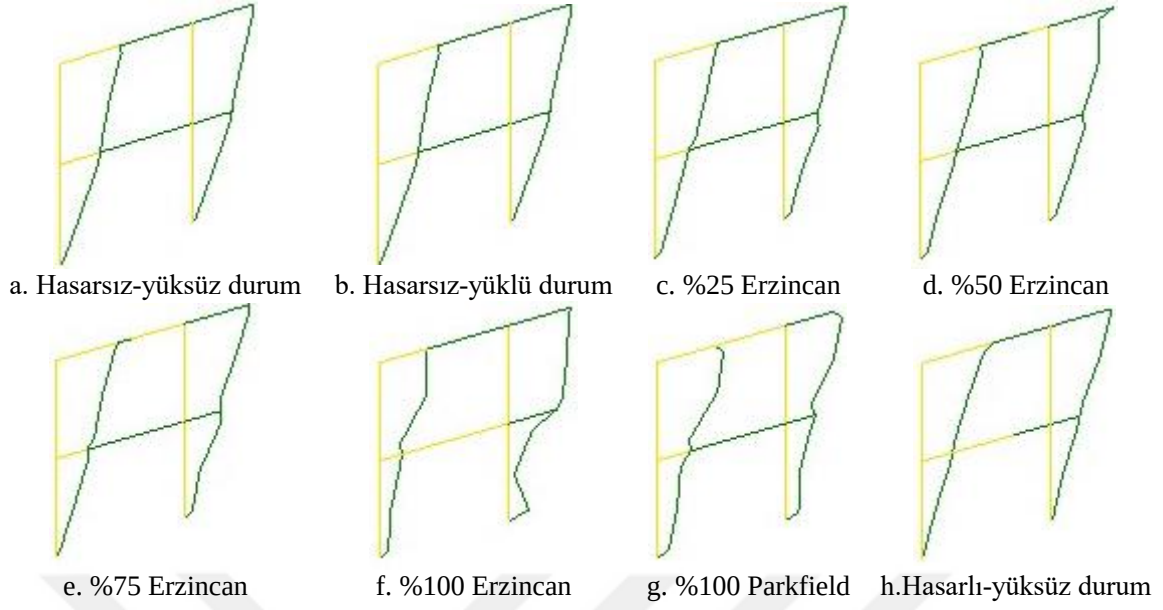
Ölçüm Durumu	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	1. Mod	2. Mod	1. Mod	2. Mod
Hasarsız-yüksüz durum	5.97	20.39	2.245	1.714
Hasarsız-yüklü durum	4.40	12.26	4.169	2.401
%25 Erzincan depremi sonrası	3.58	10.82	7.307	2.367
%50 Erzincan depremi sonrası	3.34	10.05	7.992	2.567
%75 Erzincan depremi sonrası	3.11	9.28	9.465	2.952
%100 Erzincan depremi sonrası	3.01	8.70	10.130	3.048
%100 Parkfield depremi sonrası	2.75	8.23	6.742	3.195
Hasarlı-yüksüz durum	3.78	12.56	3.748	2.561

Çevresel titreşim testleri ile elde edilen frekans ve sönüm oranlarının, gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarla birlikte değişimi Şekil 3.49'da sunulmuştur.

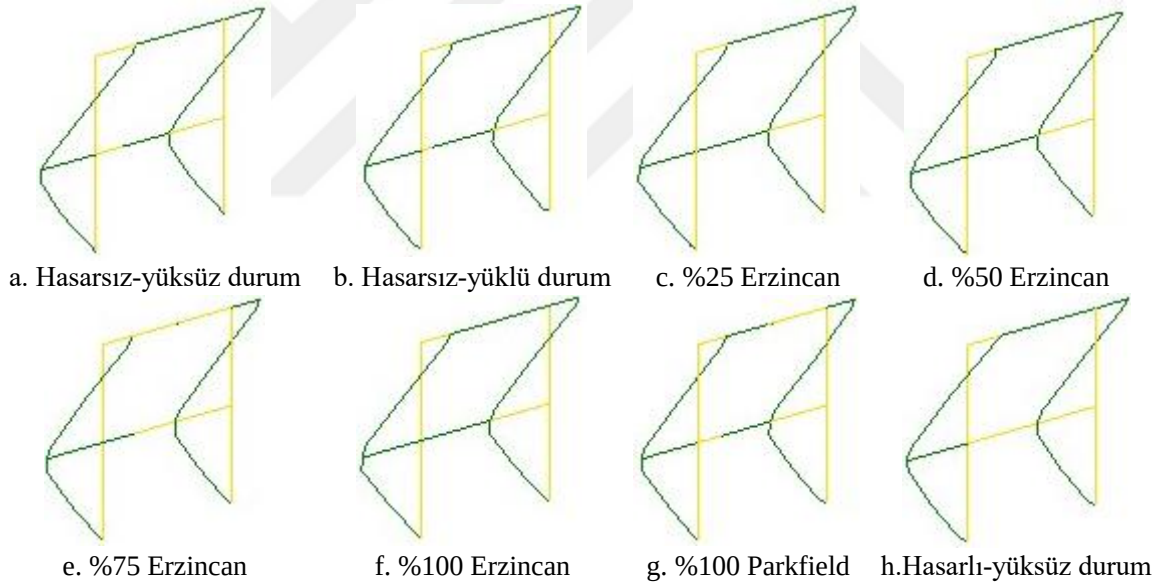
Bu grafik incelendiğinde sarsma masasına uygulanan yük düzeyinin artması ile birlikte frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasarsız-yüklü durumda elde edilen frekans değerleri referans alındığında ilk iki frekanstaki azalmalar %25 Erzincan depremi sonrası %18.52-%11.75, %50 Erzincan depremi sonrası %24.11-%18.03, %75 Erzincan sonrası %29.21-%24.28, %100 Erzincan depremi sonrası %31.55-%29.08 ve %100 Parkfield depremi sonrası %37.51-%32.85 olarak elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız-yüksüz duruma göre sarsma masası deneyleri sonrası ilave kat kütlelerinin indirildiği durumda elde edilen ilk iki moda ait frekans değerlerinin %36.71-%38.40 azaldığı tespit edilmiştir. Öte yandan artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin de artma eğilimi gösterdiği ve bu değerlerde frekans değerlerine kıyasla daha büyük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. İlk iki mod şekilleri Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’de her bir hasar durumu için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar seviyesinin artmasıyla birlikte mod şekillerinde de önemli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.49. Deney-3’te elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi



Şekil 3.50. Deney-3'te elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi

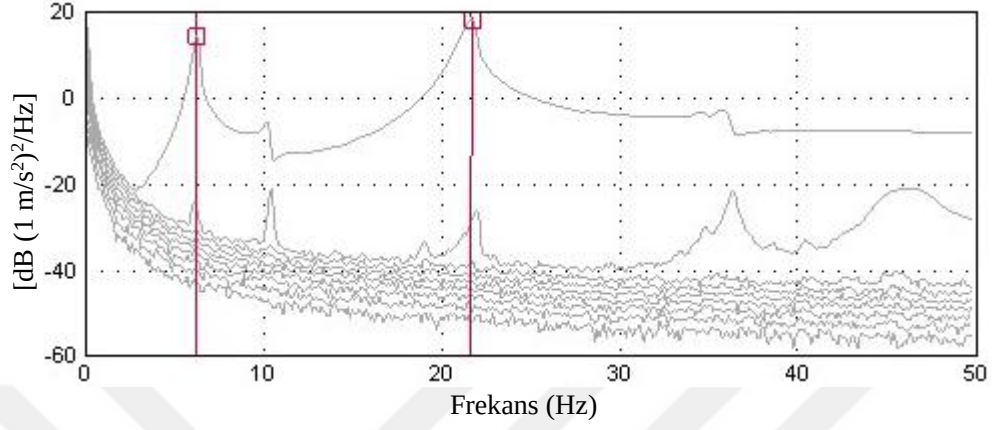


Şekil 3.51. Deney-3'te elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi

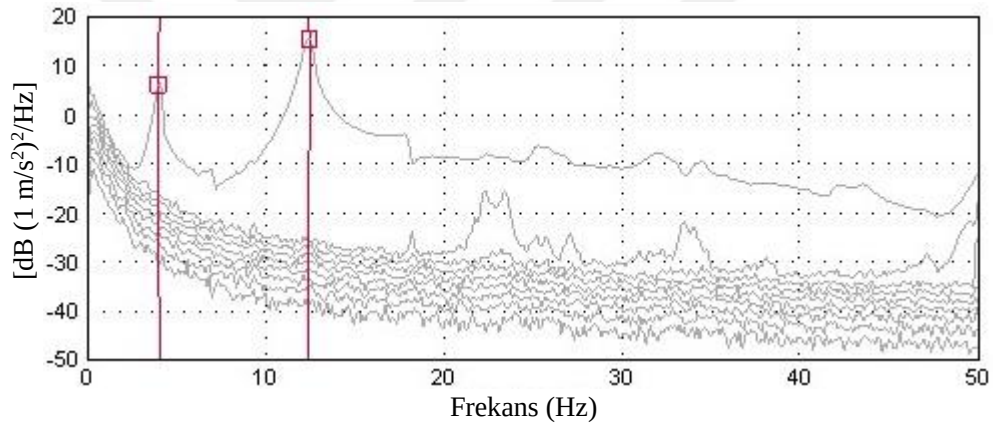
3.5.5. Deney-4 (Aynı Yüksekliğe Sahip Binaların Çarpışması-Kauçuklu)

Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen SYMTD grafikleri ve bu grafikteki piklerin

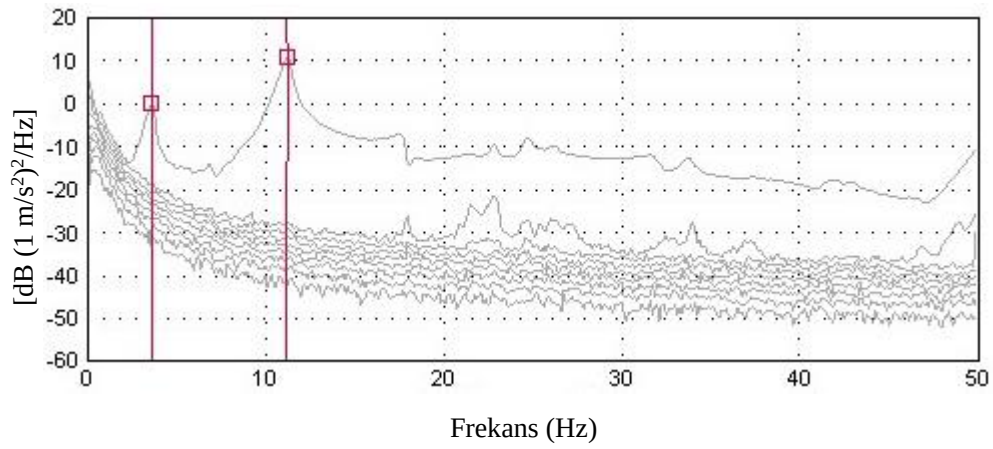
seçilmesiyle elde edilen her bir yapısal moda ait frekans değerleri Şekil 3.52’de sunulmaktadır.



a. Hasarsız-yüksüz durum



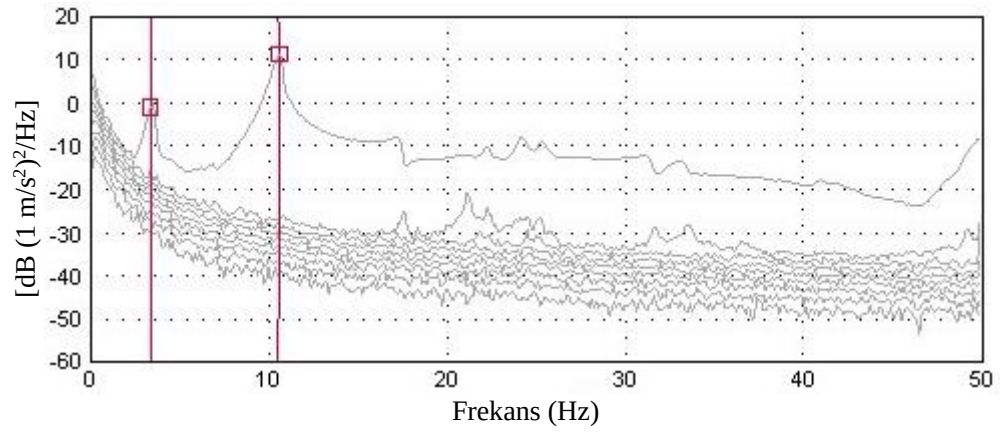
b. Hasarsız-yüklü durum



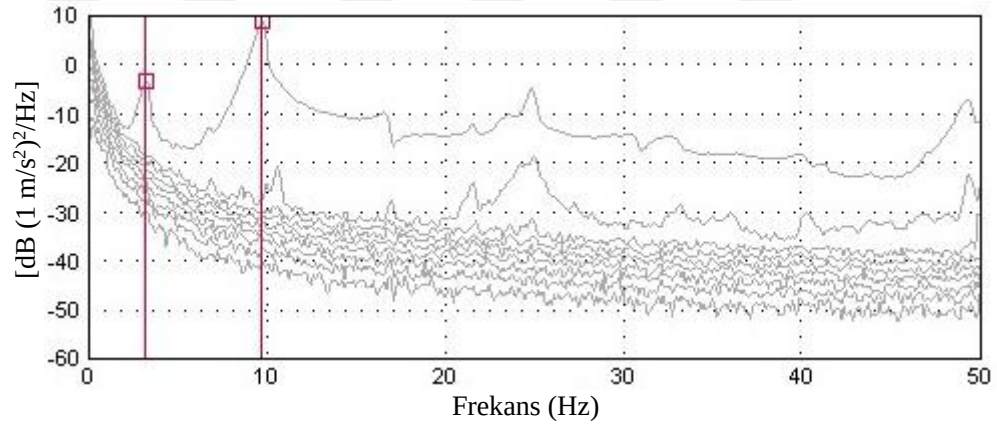
c. %25 Erzincan depremi sonrası

Şekil 3.52. Deney-4’te elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

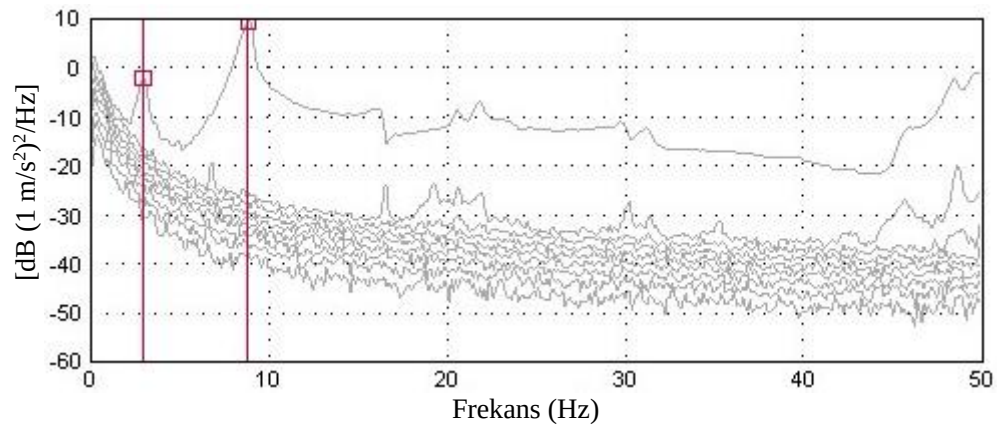
Şekil 3.52'nin devamı,



d. %50 Erzincan depremi sonrası

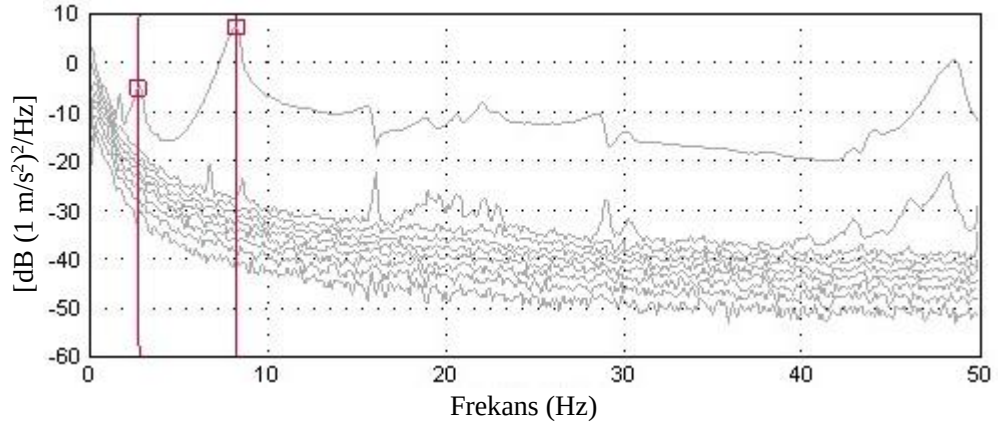


e. %75 Erzincan depremi sonrası

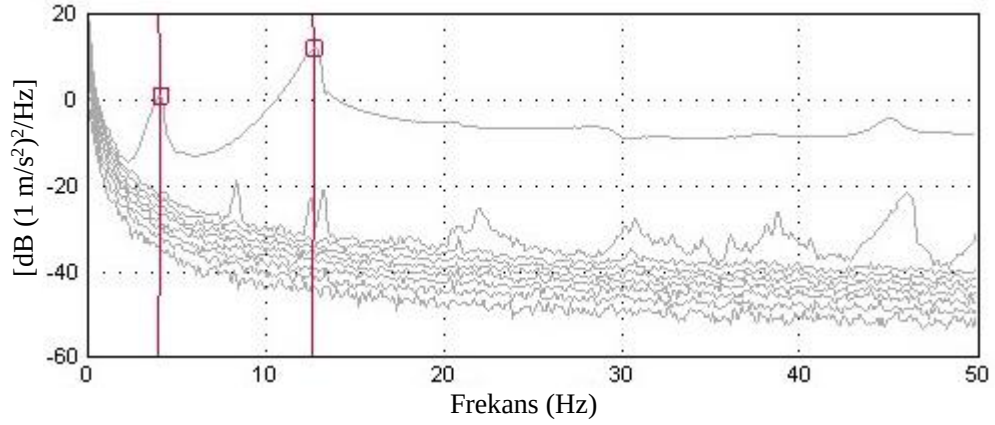


f. %100 Erzincan depremi sonrası

Şekil 3.52'nin devamı,



g. %100 Parkfield depremi sonrası



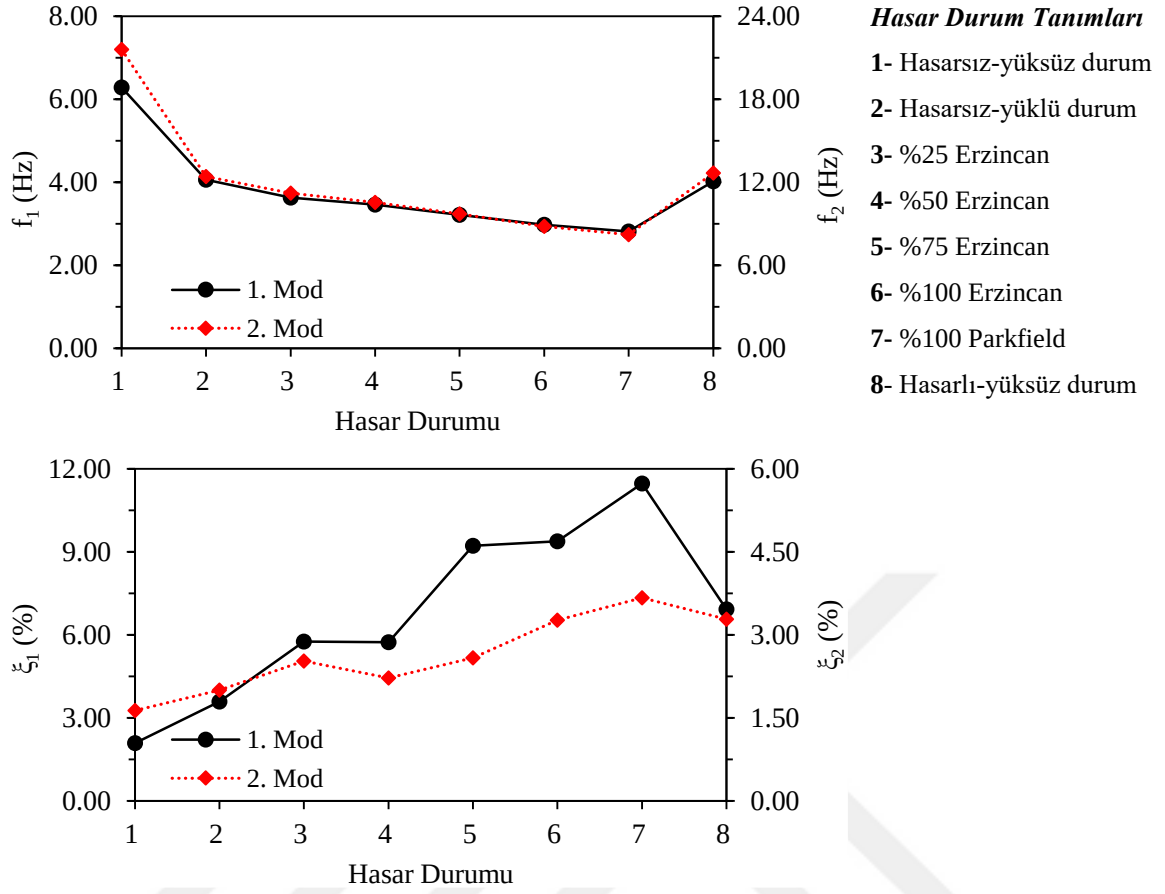
h. Hasarlı-yüksüz durum

GFOA yöntemi ile bu deneyde her bir adım için elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 3.11'de sunulmuştur. İlk iki moda ait frekans değerleri, hasarsız yüksüz durum için 6.28Hz-21.59Hz, hasarsız yüklü durum için 4.06Hz-12.42Hz, %25 Erzincan depremi sonrası 3.63Hz-11.21Hz, %50 Erzincan depremi sonrası 3.46Hz-10.55Hz, %75 Erzincan sonrası 3.22Hz-9.71Hz, %100 Erzincan depremi sonrası 2.98Hz-8.82Hz ve %100 Parkfield depremi sonrası 2.81Hz-8.21Hz olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında ilave kat ağırlıklarının indirildiği durumda alınan ölçümlerde bu frekanslar 4.02Hz-12.66Hz olarak elde edilmiştir.

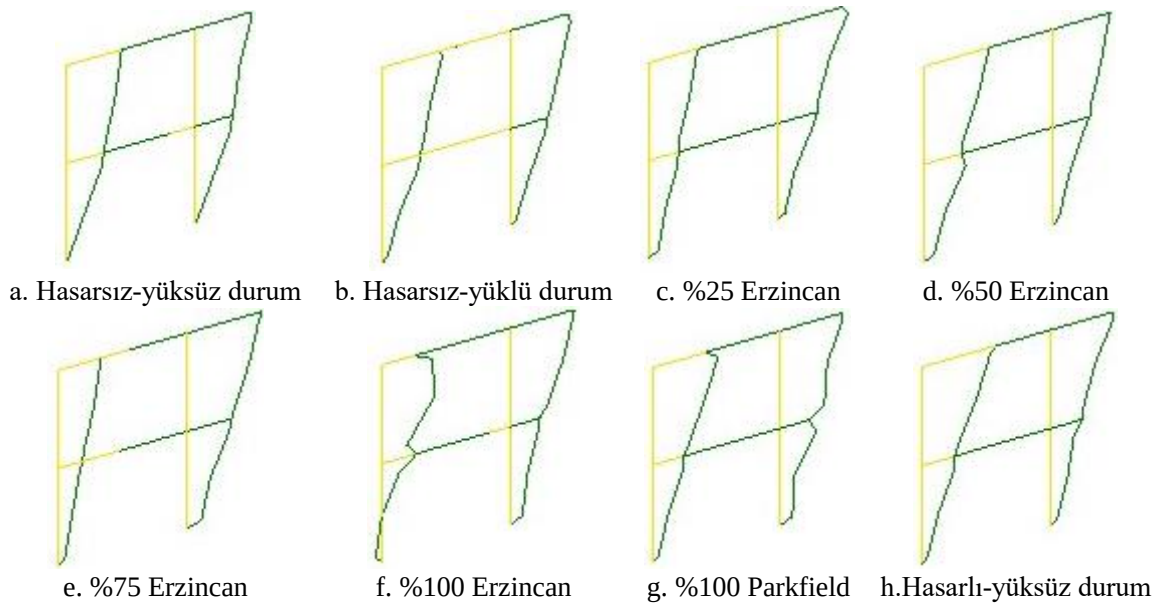
Tablo 3.11. Deney-4'te elde edilen frekans ve sönüm oranları

Ölçüm Durumu	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	1. Mod	2. Mod	1. Mod	2. Mod
Hasarsız-yüksüz durum	6.28	21.59	2.089	1.634
Hasarsız-yüklü durum	4.06	12.42	3.587	2.003
%25 Erzincan depremi sonrası	3.63	11.21	5.753	2.527
%50 Erzincan depremi sonrası	3.46	10.55	5.729	2.218
%75 Erzincan depremi sonrası	3.22	9.71	9.220	2.582
%100 Erzincan depremi sonrası	2.98	8.82	9.381	3.265
%100 Parkfield depremi sonrası	2.81	8.21	11.470	3.668
Hasarlı-yüksüz durum	4.02	12.66	6.926	3.282

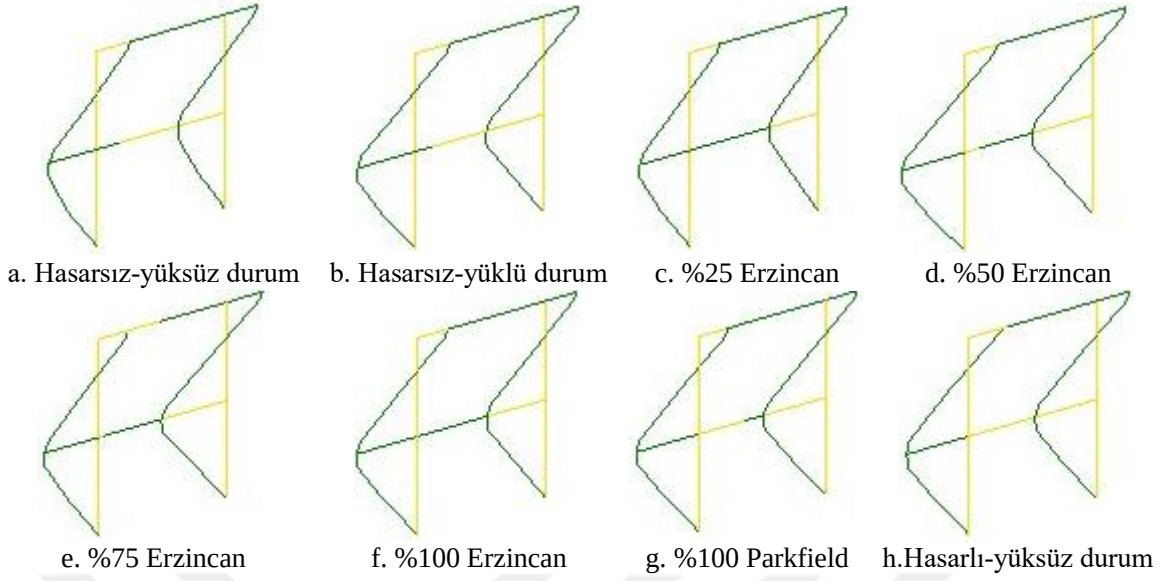
Çevresel titreşim testleri ile elde edilen frekans ve sönüm oranlarının, gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarla birlikte değişimi Şekil 3.53'te sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde sarsma masasına uygulanan yük düzeyinin artması ile birlikte frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasarsız-yüklü durumda elde edilen frekans değerleri referans alındığında ilk iki frekanstaki azalmalar %25 Erzincan depremi sonrası %10.64-%9.74, %50 Erzincan depremi sonrası %14.73-%15.06, %75 Erzincan sonrası %20.79-%21.85, %100 Erzincan depremi sonrası %26.71-%29.02 ve %100 Parkfield depremi sonrası %30.70-%33.90 olarak elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız-yüksüz durum göre sarsma masası deneyleri sonrası ilave kat kütlelerinin indirildiği durumda elde edilen ilk iki moda ait frekans değerlerinin %35.99-%41.36 azaldığı tespit edilmiştir. Diğer deneylerde de olduğu gibi artan hasarla birlikte sönüm oranı değerleri de artma eğilimi göstermektedir. İlk iki mod şekilleri Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'te her bir hasar durumu için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar seviyesinin artmasıyla birlikte mod şekillerinde de önemli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.53. Deney-4'te elde edilen frekans ve sönüm oranlarının farklı hasar durumlarına göre değişimi



Şekil 3.54. Deney-4'te elde edilen ilk mod şekillerinin hasarla değişimi



Şekil 3.55. Deney-4'te elde edilen ikinci mod şekillerinin hasarla değişimi

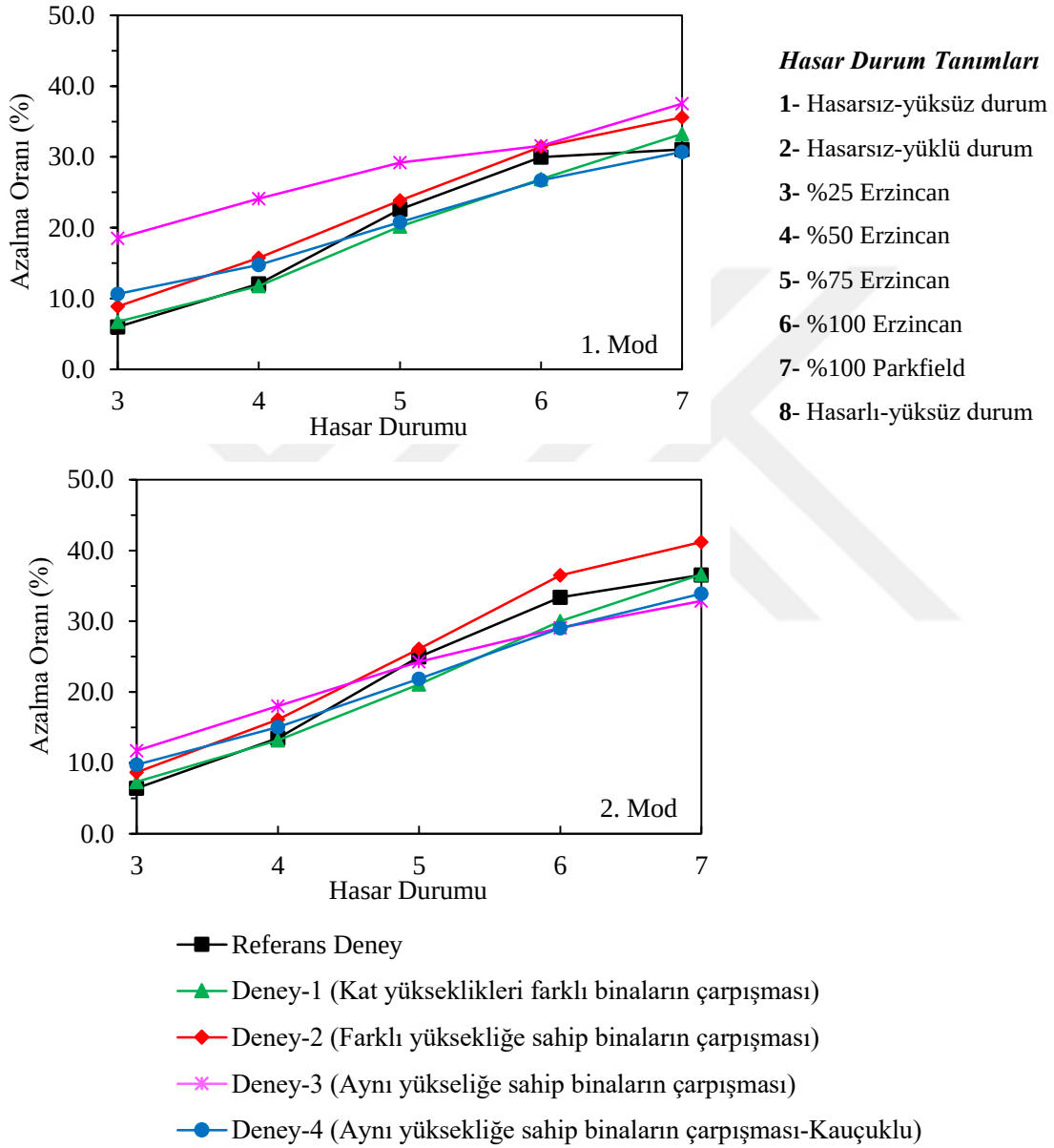
3.5.6. Çarpışma Türleri İçin Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Daha önceki bölümlerde, sarsma masası deneylerinden sonra elde edilen dinamik karakteristikler kendi içerisinde kıyaslanmış, frekans, sönüm oranı ve mod şekillerinin hasarla birlikte değişimi kendi içlerinde tartışılmıştır. Bu bölümde ise farklı çarpışma türlerinin incelendiği sarsma masası deneylerinde elde edilen dinamik karakteristikler, çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerinin dinamik karakteristiklere olan etkileri ayrıntılı bir biçimde incelenmeye çalışılmıştır. Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'te her bir sarsma masası deneyinde elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri verilmiştir. Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'ten de görüleceği gibi her bir deneydeki hasarsız duruma ait başlangıç dinamik karakteristiklerde bir takım farklılıklar bulunmaktadır. İmalat süreci ve malzemenin homojen olmayan yapısı numunelerin dinamik karakteristikleri üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca sarsma masası deneyleri diğer test yöntemlerine kıyasla oldukça kısa süreli deneyler olmasına karşın, deneylere başlamadan önceki süreçler (deney düzeneklerinin kurulumu ve her bir deney sonrasında verilerin işlenmesi) dikkate alındığında her bir deney arasında uzun zaman aralıkları bulunabilmektedir. Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar yaklaşık 2 yıl süre içerisinde tamamlanmıştır. Kurulum süreci gerçekleştirilen her bir deneyin sarsma masası ve çevresel titreşim testleri gün içinde tamamlanmıştır. Deneylerin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi gündelik ortam

koşullarının (sıcaklık, nem vb.) değişmesini nispeten engellese de mevsimsel geçişler bu koşulları önemli ölçüde değiştirmektedir. Ortam koşullarındaki değişimlerin dinamik karakteristikler üzerinde önemli etkileri olabilmektedir (Xia vd., 2012; Wang vd., 2022). Tüm bu nedenlerden dolayı numunelerin dinamik karakteristiklerdeki bu farklılıklar beklendik bir durumdur. Dolayısıyla doğrudan frekans değerleri üzerinden karşılaştırma yapmak doğru bir değerlendirme yöntemi olmamaktadır. Bunun yerine her bir numune için frekans değerlerindeki azalma oranları dikkate alınmıştır (Şekil 3.56). Bu azalma oranları hasarsız-yükli durumda elde edilen frekans değerleri referans alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.56 incelendiğinde, artan yer hareketi büyüklüğü ile birlikte frekans değerlerinde önemli azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Salawu (1997), bir yapının rijitliğindeki anormal kayıpların dolayısıyla hasarların doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için doğal titreşim frekansının %5.00 oranında değişmesi gerektiğini ifade etmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alındığı ve alınmadığı tüm deneylerde %25 Erzincan depremi sonrasında frekanslarda azalma miktarı %5.00'in üzerinde olmuştur. Bu deprem sonucunda en az değişim Referans deneyde meydana gelmiş olup ilk iki moda ait frekans değeri %5.97 ve %6.41 oranında azalmıştır. İlk moda ait frekans değerleri karşılaştırıldığında en büyük değişimler aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3'te elde edilmiştir. Bu durum sarsma masası deneylerinden elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Dikkate alınan deprem düzeylerinde bu çarpışma türünün diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyük yapısal tepkilere neden olduğu, özellikle kat ivmelerini ve taban kesme kuvvetlerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2'de de değişim oranı Referans deneye kıyasla daha büyüktür. Kolon-döşeme etkileşiminin incelendiği deneylerde frekanslardaki azalma oranı ise Referans deneye benzer trende sahiptir. Çarpışma etkilerinin azaltılması amacıyla çarpışma bölgelerine kauçuk levhaların yerleştirildiği bu deneylerde ise Deney-3'e benzer şekilde her iki katta döşeme-döşeme çarpışması dikkate alınmıştır. Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen frekans değişim değerleri kıyaslandığında, kauçuk levhaların çarpışma hasarlarını azaltma konusunda etkili olabileceği görülmektedir. Nitekim geçmiş bölümlerde bahsedildiği üzere sarsma masası deneyleri sonucunda da çarpışma nedeniyle ortaya çıkan yapısal tepkileri azaltma konusunda kauçuk levhaların etkili olabilecekleri ortaya koyulmuştur. İkinci moda ait frekans değerleri kıyaslandığında ise hasar nedeniyle frekanslardaki azalma oranlarında büyük farklar görülmemektedir. Ancak farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2'de çarpışmanın tek katta gerçekleşmesi

nedeniyle sarsma masası deneyleri sırasında çarpışmanın olduğu yöndeki 2. kat kolonunun alt ucunda önemli hasarların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum Şekil 3.56'da verilen ikinci moda ait frekans değişim grafiğine de yansımış olup artan yer hareketi büyüklüğüne bağlı olarak daha da belirgin hale gelmiştir.



Şekil 3.56. Hasar durumlarına göre ilk iki moda ait frekansların değişimi

Tablo 3.12. Titreşim testleri sonucunda elde edilen frekans değerleri

Hasar Durumu/Deney	Referans Deney	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4
İlk Moda Ait Frekans Değerleri (Hz)					
Hasarsız-yüksüz durum	5.83	6.54	6.58	5.97	6.28
Hasarsız-yüklü durum	3.80	4.26	4.21	4.40	4.06
%25 Erzincan depremi sonrası	3.57	3.98	3.84	3.58	3.63
%50 Erzincan depremi sonrası	3.34	3.76	3.55	3.34	3.46
%75 Erzincan depremi sonrası	2.94	3.40	3.21	3.11	3.22
%100 Erzincan depremi sonrası	2.66	3.12	2.89	3.01	2.98
%100 Parkfield depremi sonrası	2.62	2.84	2.71	2.75	2.81
Hasarlı-yüksüz durum	3.38	3.82	3.68	3.78	4.02
İkinci Moda Ait Frekans Değerleri (Hz)					
Hasarsız-yüksüz durum	20.75	20.91	22.51	20.39	21.59
Hasarsız-yüklü durum	11.70	11.99	12.78	12.26	12.42
%25 Erzincan depremi sonrası	10.95	11.11	11.67	10.82	11.21
%50 Erzincan depremi sonrası	10.12	10.41	10.72	10.05	10.55
%75 Erzincan depremi sonrası	8.78	9.46	9.45	9.28	9.71
%100 Erzincan depremi sonrası	7.80	8.39	8.11	8.70	8.82
%100 Parkfield depremi sonrası	7.43	7.60	7.52	8.23	8.21
Hasarlı-yüksüz durum	11.63	11.96	11.57	12.56	12.66

Tablo 3.13. Titreşim testleri sonucunda elde edilen sönüm oranları

Hasar Durumu/Deney	Referans Deney	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4
İlk Moda Ait Sönüm Oranları (%)					
Hasarsız-yüksüz durum	1.902	1.875	2.365	2.245	2.089
Hasarsız-yüklü durum	4.902	9.856	5.426	4.169	3.587
%25 Erzincan depremi sonrası	4.656	7.640	6.487	7.307	5.753
%50 Erzincan depremi sonrası	7.189	9.196	7.339	7.992	5.729
%75 Erzincan depremi sonrası	8.270	10.960	9.589	9.465	9.220
%100 Erzincan depremi sonrası	10.100	11.890	10.350	10.130	9.381
%100 Parkfield depremi sonrası	4.972	11.710	9.636	6.742	11.470
Hasarlı-yüksüz durum	-	3.965	4.704	3.748	6.926
İkinci Moda Ait Sönüm Oranları (%)					
Hasarsız-yüksüz durum	1.813	1.673	1.993	1.714	1.634
Hasarsız-yüklü durum	2.194	2.600	2.358	2.401	2.003
%25 Erzincan depremi sonrası	2.007	2.569	2.914	2.367	2.527
%50 Erzincan depremi sonrası	2.545	2.685	2.576	2.567	2.218
%75 Erzincan depremi sonrası	3.412	3.202	3.055	2.952	2.582
%100 Erzincan depremi sonrası	3.731	3.192	4.193	3.048	3.265
%100 Parkfield depremi sonrası	3.526	3.854	4.323	3.195	3.668
Hasarlı-yüksüz durum	-	3.642	3.460	2.561	3.282

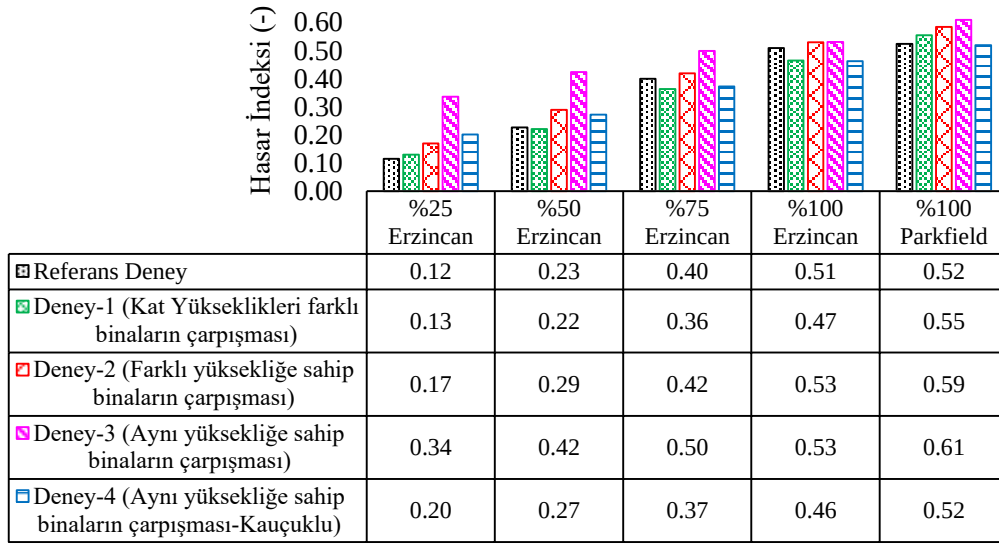
Tablo 3.13'ten görüleceği üzere artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin de artma eğilimi gösterdiği ve bu değerlerde frekans değerlerine kıyasla daha büyük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Cao vd. (2017), sönüm oranının frekans ve mod şekline kıyasla bazı hasarlar durumlarına karşı daha hassas olduğunu ve hasarı tanımlamada sönüm oranı üzerine daha fazla çalışma yürütülmesinin gerektiği ifade etmiştir. Ayrıca Günaydın (2016), çevresel titreşim testleri esnasında deney numunesinde oluşan farklı büyüklükteki titreşim sinyallerinin sönüm oranlarını etkileyebildiğini ve dolayısıyla sönüm oranında meydana gelen değişimlerin doğrudan hasar büyüklüğü ile ilişkilendirilemeyeceğini ifade etmiştir.

Araştırmacılar, yapı frekansındaki değişimlerin depreme maruz kalan binalardaki hasarı değerlendirmek için uygun bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir (DiPasquale ve Çakmak, 1988; DiPasquale vd., 1990; Zembaty vd., 2006; Garcia vd., 2014). Bu tez çalışmasında da, farklı büyüklükteki yer hareketleri ile test edilen deney numunelerinin yapısal hasarını nicel olarak değerlendirmek için DiPasquale vd. (1990) tarafından önerilen hasar indeksi (DI) kullanılmıştır. Bu hasar indeksi hasarsız (f_i) ve hasarlı durumda elde edilen doğal titreşim frekansları (f_f) dikkate alınarak Denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır.

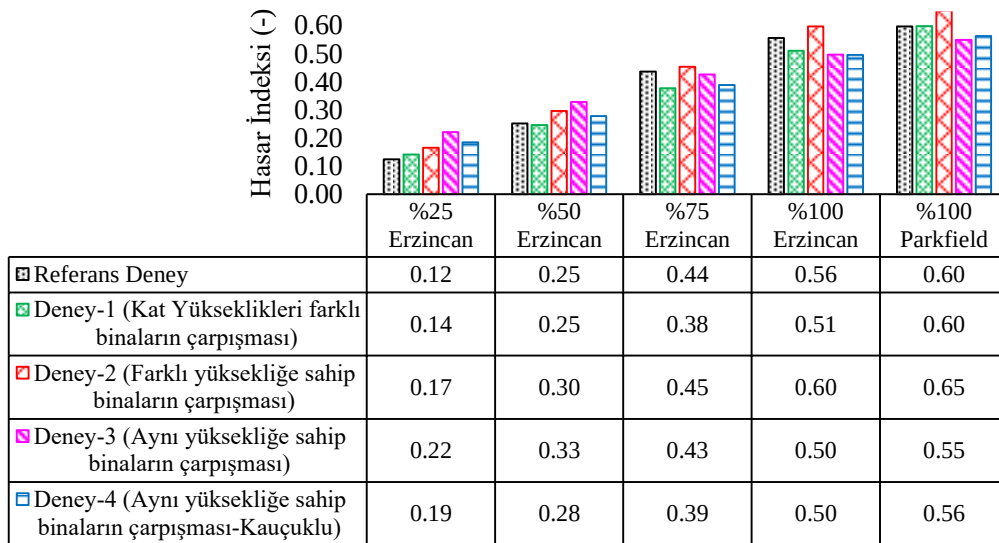
$$DI = 1 - \left(\frac{f_f}{f_i} \right)^2 \quad (3.1)$$

Her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarlı durumdaki frekans değerleri ile hasarsız duruma ait frekans değeri kullanılarak elde edilen DI değerleri Şekil 3.57'de verilmiştir. DI 'nın sifıra eşit olması binada herhangi bir hasar olmadığı anlamına gelirken, 1.00 olması yapının teorik olarak çökmesini temsil etmektedir. Ancak Garcia vd. (2014), DI değerlerinin belirli bir hasar durumuyla doğrudan ilişkilendirilmeden önce kalibre edilmesi gerektiğini, ancak yapıların farklı test aşamaları sırasında maruz kaldıkları genel yapısal hasarı nicel olarak karşılaştırmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 3.57'den görüldüğü gibi en büyük hasar indeksleri ilk mod için 0.61, ikinci mod için 0.65 olarak %100 Parkfield depreminden sonra elde edilmiştir. Bu değerlerin teorik göçmeyi temsil eden 1.00 değerine nispeten uzak olduğu görülmektedir. Deney numunelerine ait hasar indeksleri kıyaslandığında çarpışma etkilerinin hasar indekslerini önemli ölçüde artırma potansiyeli olduğu görülmektedir. Özellikle aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği deneyde hasar indekslerinde ilk mod için %189.93 ve ikinci mod için %78.18'e ulaşan

artışların meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde farklı kat yüksekliğine sahip binaların çarpışmasının incelendiği deneyde ilk mod için %46.51 ve ikinci mod için %33.90'a ulaşan artışlar gözlenmiştir. Ayrıca çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde de özellikle kolon-döşeme çarpışmasının incelendiği deneylere kıyasla hasar indekslerinde bazı artışların elde edildiği ve bu artışın %13.61'i geçmediği görülmüştür. Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen veriler kıyaslandığında çarpışma bölgelerine yerleştirilen kauçuk levhaların hasarları azaltma konusunda etkili olabileceğini ve hasar indekslerinde %66.74'e varan azalmalar sağladığı tespit edilmiştir.



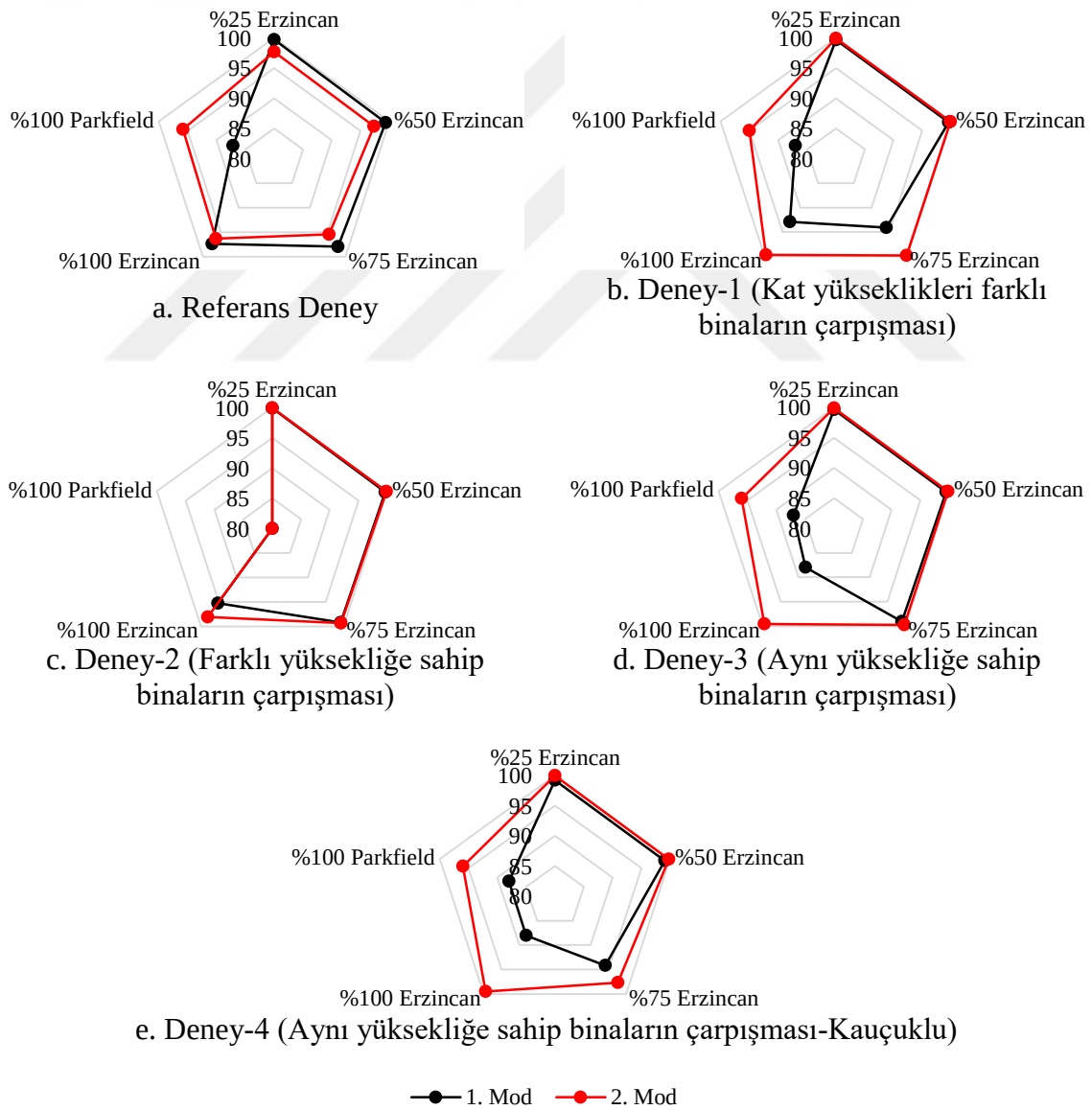
a. 1. Mod



b. 2. Mod

Şekil 3.57. Hasar indeksleri

Mod şekillerinde meydana gelen değişimleri dikkate alarak, bir diğer deyişle mod şekillerinin benzerliklerini karşılaştırmak ve hasarla birlikte değişimlerini ortaya koymak amacıyla MGK değerleri elde edilmiştir. MGK değeri Denklem (1.23) kullanılarak elde edilir. MGK değerinin 1.00'e yakın olması farklı durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliğin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla MGK değerlerindeki belirgin azalmalar hasarın varlığını ortaya koymaktadır. MGK değerleri, her bir numunenin hasarsız ve sarsma masası deneyleri sonrası hasarlı durumlarında elde edilen mod şekilleri kıyaslanarak elde edilmiştir. Artan hasarla birlikte azalan MGK değerleri Şekil 3.58'de sunulmuştur.



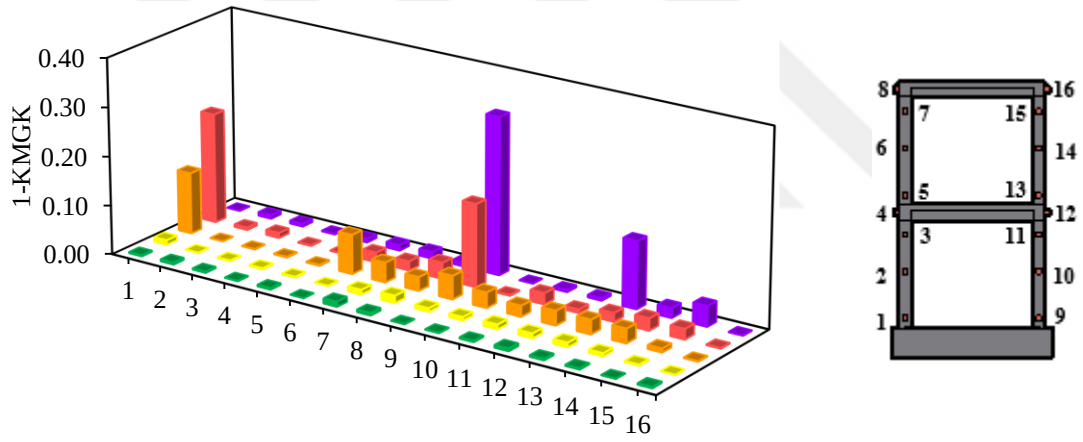
Şekil 3.58. MGK değerlerinin (%) artan hasarla değişimi

Şekil 3.58’den görüleceği üzere, %25 ve %50 Erzincan depremleri sonrasında MGK değerlerinde önemli değişimler meydana gelmemiştir. Ancak artan yer hareketi büyüklüğüyle birlikte MGK değerlerinde belirgin azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı referans deney numunesi ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı numunelerdeki MGK değerlerinin değişimi incelendiğinde, çarpışmanın neden olduğu hasarların yapıların mod şekilleri üzerinde kritik etkileri olduğu söylenebilir.

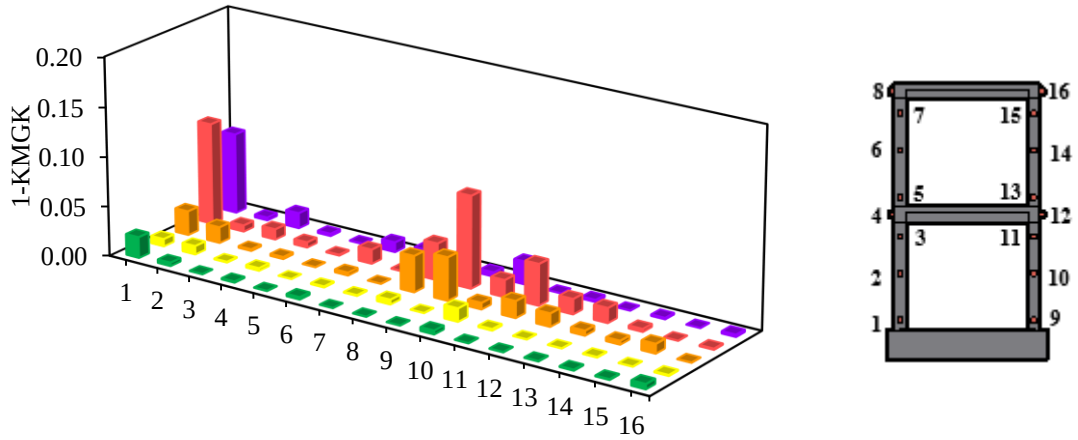
Bununla birlikte, geçmiş sarsma masası deneylerinden elde edilen sonuçlar, global bir hasar indeksi kullanarak yakalanması çok kolay olmayan önemli yerel hasarların meydana gelebileceğini göstermiştir (Garcia vd., 2014). Bu nedenle çarpışma etkilerinin yapısal elemanlarda neden olduğu hasarlar Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK) değerlerinde oluşan değişimler dikkate alınarak da incelenmiştir. Her bir sarsma masası deneyi sonrasında elde edilen KMGK değerleri, hasarın varlığını ve bu hasarların ölçüm alınan noktaların hangilerinde yoğunlaştığını ortaya çıkarmaktadır. Bu yöntem farklı hasar durumlarında elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliği yerel olarak değerlendirilmesi nedeniyle yerel hasarların takip edilmesini de sağlamaktadır. KMGK değerleri Denklem (1.24) kullanılarak hasarsız ve hasarlı durumlardaki mod genliklerinden elde edilmiştir. Okur (2017), KMGK değerlerinde artan hasarla birlikte meydana gelen azalmaların oldukça küçük olması nedeniyle hatalı değerlendirmeler yapmamak ve hasarın meydana geldiği ölçüm noktasının açık bir biçimde tespit edilmesi için verileri, 1- KMGK değerleri üzerinden karşılaştırmıştır. Dolayısıyla 1- KMGK değerinin artması hasarın ilgili ölçüm noktasında oluştuğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada da benzer şekilde değerlendirme yapılmıştır. Şekil 3.59’da çarpışma etkilerinin dikkate alındığı ve alınmadığı deneylerden elde edilen 1- KMGK değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu değerler çevresel titreşim testlerinde dikkate alınan 16 ölçüm noktası için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Şekil 3.59 incelendiğinde, tüm deney numunelerinde 1 ve 9 numaralı ölçüm noktalarında hasarın varlığı bariz bir şekilde görülmektedir. Bölüm 3.6’da bahsedildiği üzere temel ve kolon arayüzünde ayrılmaların tüm numunelerde oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıktığı, 1 ve 9 numaralı ölçüm noktalarında elde edilen 1-KMGK değerlerindeki artışın mevcut hasarlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Öte yandan, artan yer hareketi büyüklüğüyle birlikte artan hasarlar farklı ölçüm noktalarının 1-KMGK değerlerinde artışlar meydana getirmiştir. Tüm deneylerde 1-KMGK değerlerinde bariz artışlar gözlenmesine karşın hasarların genellikle bazı ölçüm noktalarında yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak %100

Parkfield depremi sonrası farklı yüksekliğe sahip komşu binalar arasındaki çarpışmaların incelendiği Deney-2’de neredeyse tüm ölçüm noktalarında hasarın varlığı açık bir biçimde görülmektedir. Bu durum Bölüm 3.6’da bahsedilen hasarlar ile uyumludur. Deney-2’de çarpışma nedeniyle hareketin engellendiği 1. kat döşeme seviyesi ile 2. kat kolon arayüzünde ayrılmalar oldukça belirgindir. 2. kat kolonlarında meydana gelen bu hasarlar diğer deneylerde oluşmamıştır. %100 Parkfield depremi sonrasında ise çarpışmanın olduğu yöndeki 2. kat kolonun alt ucunda çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmış ve betonda dökülmeler meydana gelmiştir. 2. kat kolonlarının üst uçlarında da birleşim bölgelerine doğru yayılan önemli hasarlar ve kabuk betonda atmalar gözlenmiştir (Şekil 3.63). Ayrıca deneyler sonunda kalıcı yer değiştirmelerinde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla diğer numunelere kıyasla 1-KMGK değerlerinin bu deneyde daha belirgin olarak artması mevcut hasarlarla uyumlu bir durumdur.



a. Referans Deney

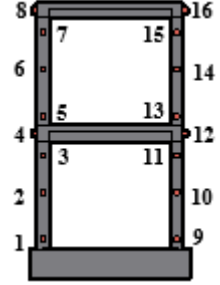
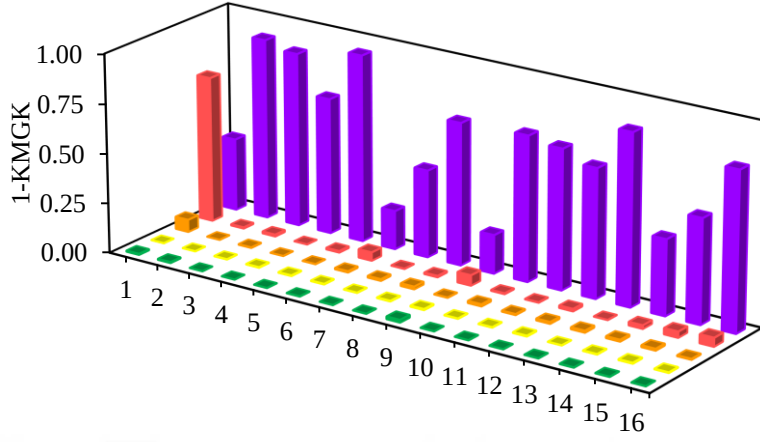


b. Deney-1 (Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması)

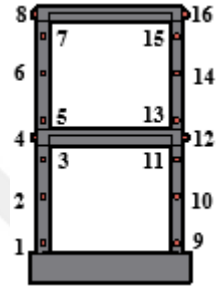
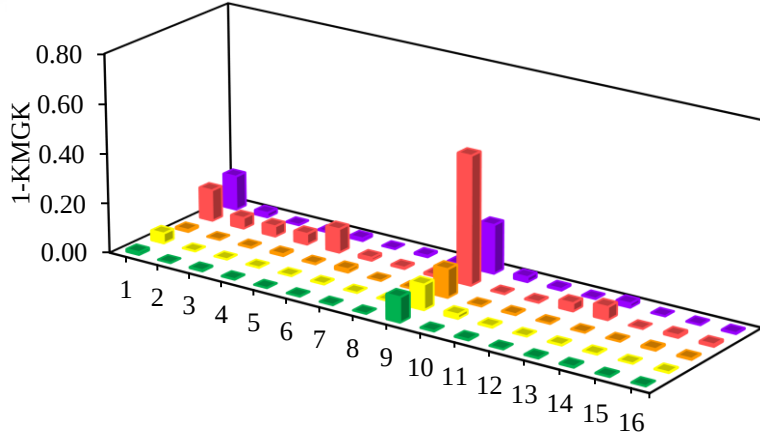
■ %25 Erzincan ■ %50 Erzincan ■ %75 Erzincan ■ %100 Erzincan ■ %100 Parkfield

Şekil 3.59. 1-KMGK değerlerinin değişimi

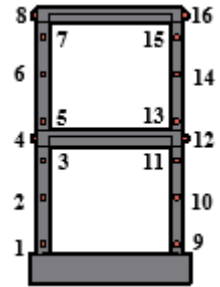
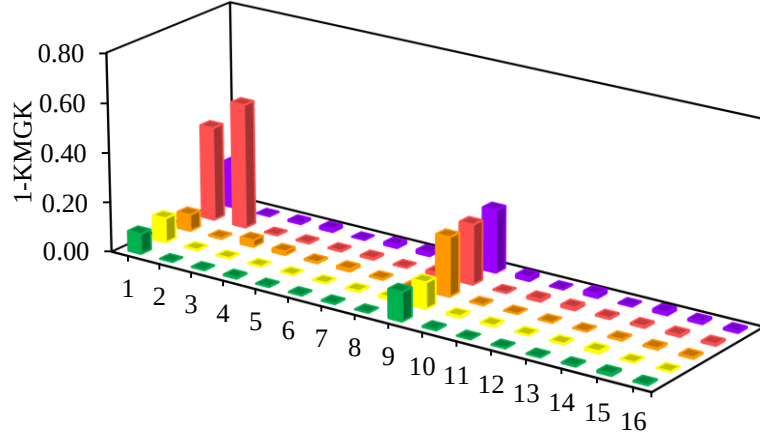
Şekil 3.59'un devamı,



c. Deney-2 (Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması)



d. Deney-3 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması)



e. Deney-4 (Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması-Kauçuklu)

■ %25 Erzincan ■ %50 Erzincan ■ %75 Erzincan ■ %100 Erzincan ■ %100 Parkfield

3.6. Sarsma Masası Deneyleri Sonrası Oluşan Hasar Biçimleri

Bu bölümde her bir sarsma masası deneyi sonrasında deney numunelerinde oluşan hasar biçimleri irdelenmiş ve çarpışma etkilerinin hasar oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sarsma masası deneyleri sonucunda oluşan hasarlar farklı renk kalemle işaretlenmiş olup, hasarlara 1-5 numaraları verilmiştir. Uygulanan en düşük yer hareketi olan %25 Erzincan depremi sonrası oluşan hasarlar 1 numara ile işaretlenirken, en büyük yer hareketi olan %100 Parkfield depremi sonrası oluşan hasarlar 5 numara ile işaretlenmiştir.

Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde %25 Erzincan depremi sonrasında ilk iki moda ait frekans değerlerinde azalma miktarı %5.97 ve %6.41 olmasına karşın çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Benzer şekilde Zembaty vd. (2006), gerçekleştirdikleri sarsma masası deneylerinde hasar nedeniyle frekanslarda meydana gelen azalmaların %10'a ulaşmasına rağmen ilk çatlakların görsel olarak tespit edilemediğini ifade etmiştir. Bu deneyde ilk çatlak en büyük yer ivme değeri 0.25g olan %50 Erzincan depremi sonrasında işaretlenmiştir. İşaretlenen çatlakların konumu her iki katta da kolon üst uçları olup çatlak kalınlığı 0.10mm'den daha küçüktür. Ayrıca üst kat girişinin bir ucunda kolon yüzeyine yaklaşık 7.50cm uzaklıkta giriş eksenine dik çatlaklar işaretlenmiş olup çatlak kalınlığı 0.10mm'den küçüktür. Hasarsız duruma kıyasla frekans değerlerindeki azalmalar bu yer hareketinde %13.50 düzeyine ulaşmıştır. %75 Erzincan depremi ile gerçekleştirilen 3. sarsma masası deneyi sonrasında kolon üst uçlarında ve birleşim bölgelerindeki mevcut çatlaklar ilerlemiş olup mevcut ve yeni çatlakların kalınlıkları 0.10mm'den küçük olduğu tespit edilmiştir. %100 Erzincan depreminin uygulandığı 4. sarsma masası deneyinden sonra çatlaklar kolon üst ucunda kesitin dört yüzünü de sarmıştır. Birleşim bölgelerinde yeni çatlak oluşumları da gözlenmiştir. %75 Erzincan depremi sonrasında kolon üst ucunda oluşan çatlakların kalınlığı önemli düzeyde artmıştır. Üst kat girişinin diğer ucunda da bu deprem sonucunda kolon yüzüne yaklaşık 20.00cm mesafede çatlaklar oluşmuştur. %100 Erzincan depremi sonrasında frekanslardaki azalmalar ilk mod için %29.97, ikinci mod için %33.37 seviyesine ulaşmıştır. En büyük yer ivmesi 0.60g olan %100 Parkfield depremi ile gerçekleştirilen testler sonrasında kolon üst ucunda oluşan mevcut çatlakların kalınlığı oldukça artmıştır. Alt kat kolonlarının üst uçlarında ciddi hasarların meydana geldiği ve bu bölgedeki betonda dökülmelerin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca kolon alt uçlarında da temel yüzeyinden yaklaşık 10.00cm mesafede (hareket yönüne dik kesit yüksekliğinin (h) yaklaşık 0.67 katı) kalınlığı 0.10mm'den az olan çatlaklar oluşmuştur. Temel ve kolon

arayüzünde ayrılmaların oldukça belirgin olduğu görülmüştür. Sarsma masası deneyleri sonrasında hasarsız duruma kıyasla frekanslardaki azalmalar ilk mod için %31.05, ikinci mod için %36.54 olarak elde edilmiştir. Referans deneyde elde edilen hasar oluşumları Şekil 3.60'da özetlenmiştir.



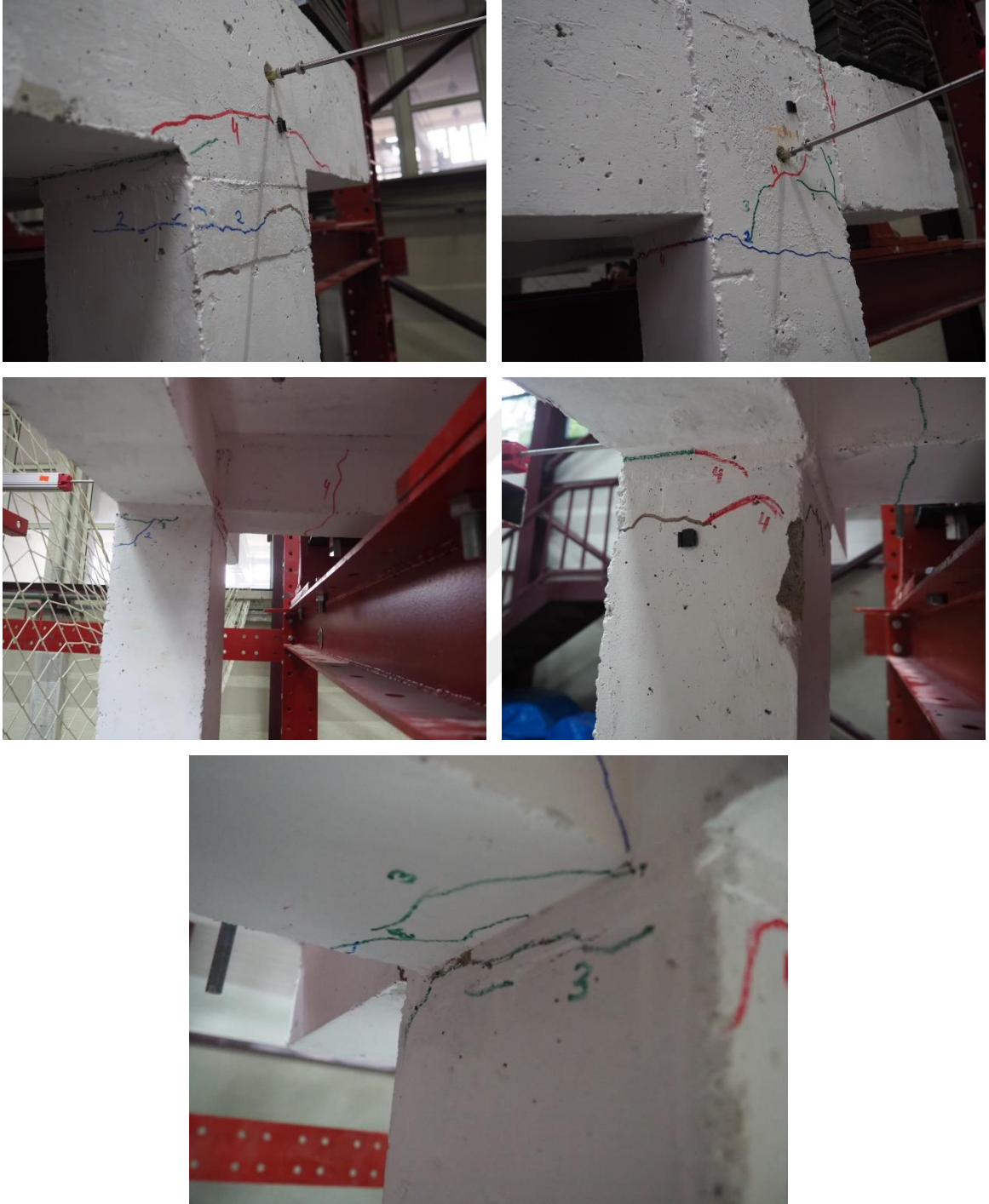
a. %50 Erzincan depremi sonrası kolon üst uçlarında oluşan çatlaklar



b. %75 Erzincan depremi sonrası kolon üst uçlarında, birleşim bölgelerinde ve giriş uçlarında oluşan çatlaklar

Şekil 3.60. Referans deneyde oluşan hasarlar

Şekil 3.60'ın devamı,



c. %100 Erzincan depremi sonrası kolon üst uçlarında, birleşim bölgelerinde ve kiriş uçlarında oluşan yeni çatlaklar ve mevcut çatlaklardaki ilerlemeler

Şekil 3.60'ın devamı,



d. %100 Parkfield depremi sonrası kolon uçlarında ve birleşim bölgelerinde oluşan yeni çatlaklar ve mevcut çatlaklardaki ilerlemeler

Şekil 3.60'ın devamı,



e. Sarsma masası deneyleri sonrasında temel-kolon arayüzünde meydana gelen ayrılımlar

Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1'de de Referans deneye benzer şekilde %25 Erzincan depremi sonrasında çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Frekans değerlerindeki azalma ise ilk mod için %6.73, ikinci mod için %7.34 olarak kaydedilmiştir. Bu azalma oranlarının %10'un üzerine çıktığı %50 Erzincan depremi sonrasında kolon üst uçlarında kalınlığı 0.10mm'dan daha az çatlaklar oluşmuştur. %75 Erzincan depremi ile gerçekleştirilen 3. sarsma masası deneyi sonrasında 2. katta çarpışmanın olduğu kolonda çarpışma bölgesinde çatlaklar meydana gelmiştir. Kalınlığı henüz 0.10mm'den daha küçük olan bu çatlaklar kolon eksenine diktir. Ayrıca betonarme çarpışma elemanı ile kolonun etkileşimi sırasında 2. kat kolonunda kabuk betonda ezilme meydana gelmiştir. %100 Erzincan depreminin uygulandığı 4. sarsma masası deneyi sonrasında ise 2. katta çarpışmanın olduğu kolonda yaklaşık 45° açığa sahip kesme çatlakları meydana gelmiştir. Bu çatlaklar kolonun her bir yüzeyinde (çarpışmanın gerçekleştiği doğrultuya paralel) işaretlenmiş ve kalınlıkları 0.10mm'den azdır. Ayrıca diğer kolonların

üst uçlarında da hasarlar işaretlenmiştir. %100 Erzincan depremi sonrasında frekanslardaki azalmalar ilk mod için %26.89, ikinci mod için %30.03 seviyesine ulaşmıştır. %100 Parkfield depremi ile gerçekleştirilen testler sonrasında çarpışmanın olduğu kolondaki mevcut kesme çatlaklarının kalınlığı önemli ölçüde artmıştır. Buna ek olarak çarpışma nedeniyle yeni kesme hasarları da oluşmuştur. Diğer kolonların üst uçlarındaki çatlaklarda ilerlemeler gözlenmiştir. Sarsma masası deneyleri sonrasında hasarsız duruma kıyasla frekanslardaki azalmalar ilk mod için %33.27, ikinci mod için %36.64 olarak elde edilmiştir. Kolon-döşeme çarpışmasında hasar oluşumları Şekil 3.61’de verilmiştir.



a. %75 ve %100 Erzincan depremleri sonrasında çarpışma nedeniyle oluşan hasarlar

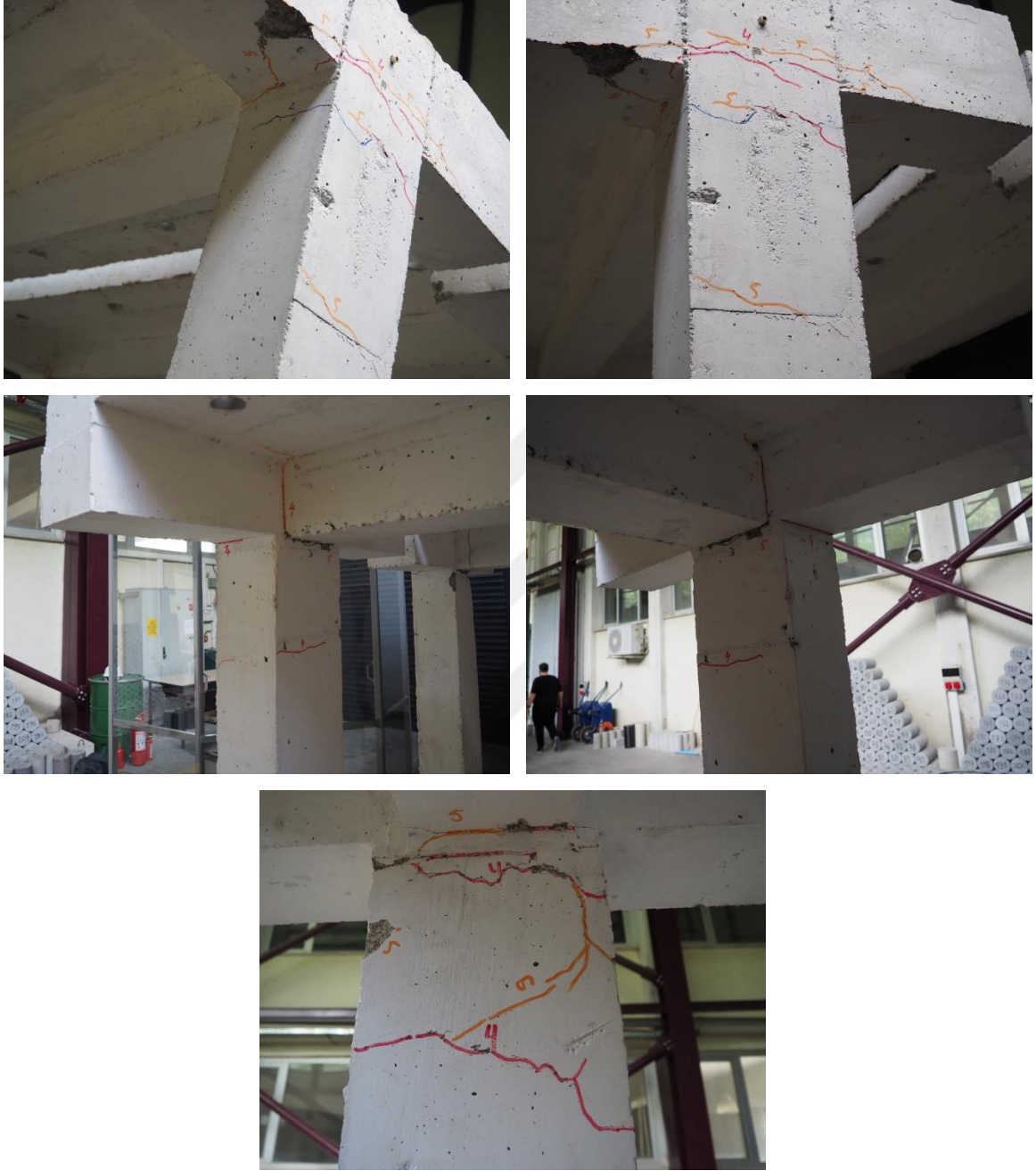
Şekil 3.61. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1’de oluşan hasarlar

Şekil 3.61'in devamı,



b. %100 Parkfield depremi sonrasında 2. kat kolonunda çarpışma nedeniyle oluşan kesme hasarları

Şekil 3.61'in devamı,



c. Sarsma masası deneyleri sonrasında işaretlenen diğer hasarlar

Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği deney sonunda çarpışma nedeniyle kolonda meydana gelen hasarlar, 23 Ekim 2011 Van depremi sonrası gözlemlenen çarpışma hasarları ile kıyaslanmıştır (Şekil 3.62). Görüleceği üzere çarpışma nedeniyle ortaya çıkan kesme kuvvetleri kolonlarda önemli hasarlara neden olabilmektedir. Deneysel çalışma ile elde edilen hasarlarda mevcut yapılarındaki hasarlara benzerdir.



a. 23 Ekim 2011 Van depremi sonrası gözlemlenen çarpışma hasarları (Korkmaz, 2015)



b. Kolon-döşeme etkileşiminin incelendiği deneylerde çarpışma nedeniyle kolonda meydana gelen hasarlar

Şekil 3.62. Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının neden olduğu kolon hasarlarının karşılaştırılması

Farklı yüksekliğe sahip komşu binalar arasındaki çarpışmaların incelendiği Deney-2’de etkileşim sadece 1. kat seviyesinde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla sarsma masası testleri sırasında 1. katın yer değiştirmeleri çarpışma nedeniyle ani bir şekilde sınırlandırılırken, 2. katta büyük görelî kat ötelemeleri meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu deneyde hasarların 2. kat taşıyıcı sistem elemanlarında yoğunlaştığı söylenebilir. Frekans değişimlerinin %10.00’un altında kaldığı %25 Erzincan depremi sonrasında çatlak oluşumu gözlenmemiştir. %50 Erzincan depreminden sonra ise her iki katta da kolon üst uçlarında kalınlığı 0.10mm’den daha küçük olan çatlakların oluşumu gözlenmiştir. %75 Erzincan depreminden sonra kolon üst uçlarında ve birleşim bölgelerinde meydana gelen mevcut

çatlak oluşumu ilerlemiş olup mevcut ve yeni çatlakların kalınlıkları 0.10mm'den küçük olduğu tespit edilmiştir. Çatlaklar kolonların üst ucunda kesitin dört yüzünü de sarmıştır. Frekans azalmalarının %30.00'u aştığı %100 Erzincan depremi sonrasında ise çarpışmanın olduğu yönde 2. kat kolonun alt ucunda yaklaşık 15.00cm yükseklik boyunca (hareket yönüne dik kesit yüksekliği (h) kadar) çatlakların meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca çarpışma nedeniyle hareketin engellendiği 1. kat döşeme seviyesi ile 2. kat kolon arayüzünde ayrılmalar oldukça belirgin hale gelmiştir. 2. kat kolonlarında meydana gelen bu hasarlar diğer deneylerde oluşmamıştır. %100 Parkfield depremi sonrasında çarpışmanın olduğu yöndeki 2. kat kolonun alt ucunda çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmış ve betonda dökülmeler meydana gelmiştir. Yine 2. kat kolonlarının üst uçlarında birleşim bölgelerine doğru yayılan önemli hasarlar ve kabuk betonda atmalar gözlenmiştir (Şekil 3.63). Öte yandan, kalıcı yer değiştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir.



a. %100 Parkfield sonrasında 2. kat kolon alt ucunda çarpışma nedeniyle oluşan hasarlar

Şekil 3.63. Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-2'de oluşan hasarlar

Şekil 63'ün devamı,



b. Sarsma masası deneyleri sonrasında 2.kat kolon üst ucunda ve birleşim bölgelerinde işaretlenen diğer hasarlar

Geçmiş yıllarda meydana gelen depremler sonrasında da bu çarpışma türünde yüksek olan binanın çarpışma etkilerinden daha fazla etkilendiği ve hasarın çarpışmanın gerçekleştiği kat ve üzerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu duruma en iyi örnek 1985 Mexico City depremi sonrasında Hotel de Carlo binasında oluşan çarpışma hasarlarıdır

(Şekil 3.64). Gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde de benzer şekilde hasarların 2. kat taşıyıcı sistem elemanlarında yoğunlaştığı söylenebilir



Şekil 3.64. 1985 Mexico City depreminde farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması nedeniyle oluşan hasarlar (URL-5; Arnold, 1985)

Aynı yüksekliğe sahip komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerinin incelendiği Deney-3'te her iki kat seviyesinde döşeme-döşeme etkileşimi dikkate alınmıştır. Çarpışmanın her iki kat seviyesinde de gerçekleşmesi sebebiyle diğer çarpışma türlerine kıyasla kolon hasarları daha azdır. Ancak kat ivmelerini ve taban kesme kuvvetlerini diğer çarpışma türlerine kıyasla önemli ölçüde artıran bu çarpışma türünde temel-1. kat kolon ve 1. kat döşeme-2. kat kolon arayüzlerinde önemli ayrılmaların meydana geldiği görülmüştür. İlk üç sarsma masası deneyi sonrasında bu ayrılmalar nedeniyle frekanslar önemli ölçüde azalmıştır. Hasarsız duruma kıyasla üçüncü sarsma masası deneyi sonunda frekans değerlerindeki azalmalar birinci mod için %29.21, ikinci mod için %24.28 olarak elde edilmiştir. %100 Parkfield depremi ile gerçekleştirilen son sarsma masası deneyi sonrasında ise frekanslar %37.51 ve %32.85 azalmıştır. Ayrıca kat kolonlarının üst uçlarında da %50 Erzincan depreminden itibaren çatlaklar oluşmaya başladığı ve artan yer hareketi büyüklüğü ile bu çatlaklarda ilerlemeler ve çatlak genişliklerinde artışlar meydana gelmiştir. Döşeme seviyesindeki hareketin çarpışma nedeniyle ani bir şekilde durdurulması 2. kat kolon üst uçlarındaki çatlak kalınlıklarının diğer çarpışma türlerine kıyasla daha fazla artmasına neden olmuştur. Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının incelendiği deneyde elde edilen hasar oluşumları Şekil 3.65'te verilmiştir.



a. Sarsma masası deneyleri sonrasında kolon üst uçlarında ve birleşim bölgelerinde işaretlenen hasarlar



b. Sarsma masası deneyleri sonrasında temel-1. kat kolon ve 1. kat döşeme-2. kat kolon arayüzlerinde meydana gelen ayrılmalar

Şekil 3.65. Aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3'te oluşan hasarlar

Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk sönümleyiciler teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri

sonucunda oluşan hasarlar Şekil 3.66’da sunulmuştur. Bu deneyde de Deney-3’e benzer şekilde her iki katta döşeme-döşeme etkileşimi dikkate alınması sebebiyle diğer çarpışma türlerine kıyasla kolon hasarları daha azdır. %50 Erzincan depreminden sonra birinci kat kolonlarının üst uçlarında kalınlığı 0.10mm’den daha küçük olan çatlakların oluşumları gözlenmiştir. %75 Erzincan depreminden sonra kolon üst uçlarında ve kiriş uç bölgelerinde yeni çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlakların kalınlıklarının 0.10mm’den küçük olduğu tespit edilmiştir. Çatlaklar 1. kat kolonların üst ucunda kesitin dört yüzünü de sarmıştır. Deney-3’e benzer şekilde bu deneylerde de temel-1. kat kolon ve 1. kat döşeme-2. kat kolon arayüzlerinde önemli ayrılmaların meydana geldiği görülmüştür. Frekans azalmalarının %25.00’i aştığı %100 Erzincan depremi sonrasında tüm kolonların üst uçlarında hasar oluşmuş ve kolonlardaki mevcut çatlaklarda önemli artışlar gözlenmiştir. Döşeme seviyesindeki hareketin çarpışma nedeniyle ani bir şekilde durdurulması 2. kat kolon üst uçlarındaki çatlak kalınlıklarının artmasına neden olmuştur. %100 Parkfield depremi sonrasında çarpışmanın olduğu yönde 1. kat kolonun alt ucunda yaklaşık 20.00cm yükseklik boyunca çatlakların meydana geldiği görülmüştür. 2. kat kolonlarının üst uçlarında birleşim bölgelerine doğru yayılan önemli hasarlar ve kabuk betonda atmalar gözlenmiştir.



a. Sarsma masası deneyleri sonrasında kolon üst uçlarında ve birleşim bölgelerinde işaretlenen hasarlar

Şekil 3.66. Çarpışma etkilerini azaltmak için kauçuk levhaların kullanıldığı Deney-4’te oluşan hasarlar

Şekil 3.66'nın devamı,



b. %100 Parkfield sonrasında 1. kat kolon alt ucunda çarpışma nedeniyle oluşan hasarlar



c. Sarsma masası deneyleri sonrasında temel-1. kat kolon ve 1. kat döşeme-2. kat kolon arayüzlerinde meydana gelen ayrılmalar

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile birlikte binaların farklı çarpışma türleri için çarpışma davranışlarının belirlenmesi, çarpışma sonrası oluşan hasarların binaların performanslarına olan etkilerinin deneysel yöntemler kullanarak incelenmesi ve çarpışma etkilerini azaltmak için kullanılabilecek uygun yöntemlerin araştırılması amaçlanmıştır. Tez kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında bulunan sarsma masasının kapasitesi göz önünde bulundurularak 1/2 ölçekli betonarme düzlem çerçeve bina modelleri kullanılmıştır.

Binalar arasındaki çarpışma davranışının incelendiği deneysel çalışmalar iki kısımdan oluşmaktadır: (i) pilot deneyler ve (ii) esas deneyler. Statik ve yarı-statik testlere kıyasla, sarsma masası deneylerinde test süresinin oldukça kısa olması ve numune üretimi, kullanılan cihazların temini vb. adımların maliyetlerinin yüksek olması bu tip dinamik deneyler öncesi yapılacak hazırlıkların ve kontrollerin önemini artırmaktadır. Bu aşamada yapılacak hazırlıklar ve kontroller, istenilen yapısal tepkilerin elde edilmesi ve deneyin amacına ulaşması açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla numunelerin tasarımından sarsma masası deneylerinin gerçekleştirilmesine kadarki tüm işlem adımları doğru bir şekilde yürütülmelidir. Bu amaçla tez kapsamında ilk olarak, esas deneylerde kullanılacak deney düzeneğinin, seçilen yer hareketlerinin, deneyler sırasında kullanılan ölçüm sistemlerinin ve deneylerde elde edilen yapısal tepkilerin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla pilot sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Pilot deneylerde 2 adet betonarme düzlem çerçeve deney numunesi kullanılmıştır. Pilot deneyler sonucunda üretilen deney düzeneğinde bir takım değişiklikler yapılmış ve esas deneylere hazır hale getirilmiştir.

İkinci kısımda, 5 adet betonarme deney numunesi kullanılarak çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney ve farklı çarpışma türlerinin dikkate alındığı çarpışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çarpışma türü olarak, kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması, farklı yüksekliğe sahip farklı binaların çarpışması ve aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması dikkate alınmıştır. Ayrıca binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk sönümleyiciler teşkil edilerek sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşenine ait ivme kaydı kullanılmıştır. Deneyler sırasında bu kaydın 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 katları artırımlı olarak uygulanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen artırımlı sarsma masası deneyleri sonrasında numunelerdeki hasar seviyelerinin artırılması amacıyla 2004 Parkfield depreminde Parkfield-Fault Zone 1 istasyonunda kaydedilmiş bir ivme kaydı da kullanılmıştır. Böylece farklı büyüklüklerdeki yer hareketleri altında komşu binalar arasındaki çarpışma davranışı incelenmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan her sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında, çevresel titreşim testleri ile frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Bu titreşim testleri, ilk olarak sarsma masasına yerleştirilen hasarsız durumdaki numunelere ilave kat kütleleri yüklendiği ve yüklenmediği her iki durum için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numuneler, artırımlı bir şekilde yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen her bir sarsma masası deneyi sonrasında numunelere ait dinamik karakteristikler tanımlanmıştır. Sarsma masası deneyleri sonrası hasarlı durumdaki yapıdan ilave kat kütleleri indirilerek titreşim testleri tekrarlanmıştır. Böylece her bir numune için 8 adet çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiş ve artan hasarla birlikte dinamik karakteristiklerdeki değişimler takip edilmiştir. Bu dinamik karakteristiklere bağlı olarak, frekans değişimleri ile yürütülen hasar tespit çalışmalarının yanı sıra mod şekillerindeki değişimleri dikkate alan hasar tespit yöntemlerinden MGK ve KMGK yöntemleri de kullanılmıştır.

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

➤ Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde 1. ve 2. katta elde edilen en büyük ivme değerleri %25 Erzincan depremi için 0.23g-0.28g, %50 Erzincan depremi için 0.31g-0.38g, %75 Erzincan depremi için 0.49g-0.71g, %100 Erzincan depremi için 0.53g-0.88g ve %100 Parkfield depremi için 0.73g-0.85g olarak elde edilmiştir. Referans deney ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deney sonuçları kıyaslandığında ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çarpışma, tüm numunelerin ivme değerlerinde kısa süreli ve yüksek genlikte pikler oluşmasına neden olmuştur. Çarpışmanın gerçekleştiği seviyede yer değiştirmelerin ani bir şekilde durması, ters yönde büyük ivme pikleri oluşturmuştur.

- Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde, %25 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük ivme değerleri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %1.89 artarken, 2. kat seviyesinde %5.59 azalmıştır. Çarpışma nedeniyle 1. ve 2. kat seviyelerindeki en büyük ivme değerlerinde artışlar %50 Erzincan depremi için %25.12-%58.23, %75 Erzincan depremi için %42.72-%39.34, %100 Erzincan depremi için %66.82-%105.14 ve %100 Parkfield depremi için %43.57-%135.57 olarak elde edilmiştir.
- Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de, %25 Erzincan depremi için 1. kat seviyesinde elde edilen en büyük ivme değerleri, Referans deneye kıyasla çarpışma nedeniyle %4.59 azalırken, 2. kat seviyesinde %1.38 artmıştır. Bu deneyde 1. ve 2. kat seviyelerindeki en büyük ivme değerlerinde artışlar %50 Erzincan depremi için %26.49-%19.88, %75 Erzincan depremi için %148.98-%12.86, %100 Erzincan depremi için %346.64-%31.99 ve %100 Parkfield depremi için %117.92-%37.84 olarak elde edilmiştir.
- Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3’te Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük ivme değerlerindeki artışlar %25 Erzincan depremi için %37.05-%53.75, %50 Erzincan depremi için %72.29-%146.23, %75 Erzincan depremi için %112.33-%146.61, %100 Erzincan depremi için %258.32-%172.32 ve %100 Parkfield depremi için %140.72-%221.85 olarak hesaplanmıştır.
- Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için numune ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise Referans deneye kıyasla 1. ve 2. kat en büyük ivme değerlerindeki artışlar %25 Erzincan depremi için %9.10-%11.61, %50 Erzincan depremi için %51.99-%85.51, %75 Erzincan depremi için %66.06-%91.88, %100 Erzincan depremi için %130.03-%175.87 ve %100 Parkfield depremi için %82.14-%280.48 olarak elde edilmiştir.

➤ Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de çarpışmanın tek bir katta gerçekleşmesi sebebiyle, referans deneye kıyasla 1. kat ivmelerindeki artışın 2. kat seviyesine kıyasla oldukça büyük olduğu görülmektedir. Özellikle yer hareketi büyüklüğünün artmasıyla bu durum daha

belirgin olmaktadır. Diğer çarpışma türlerinde ise bunun tam tersine çarpışma etkileri nedeniyle 2. kat seviyesinde ivme değerlerindeki artışların çok daha büyük olduğu görülmektedir.

➤ Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3'te, dikkate alınan deprem düzeylerinin çoğunda diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyük ivme tepkileri elde edilmiştir.

➤ Çarpışma etkilerinin azaltılması amacıyla çarpışma bölgelerine kauçuk levhaların yerleştirildiği deneylerde, Deney-3'e benzer şekilde her iki katta döşeme-döşeme çarpışması dikkate alınmıştır. Dolayısıyla Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen ivme-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde deney numunelerinin sarsma masası deneyleri sırasında birçok kez çarpıştığını ve kauçuk levhaların bu çarpışmalar sırasında oluşan ivmeleri önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.

➤ İvme büyütme faktörlerinin farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2'nin haricinde tüm deneylerde yükseklik ile beraber artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

➤ Çarpışmanın dikkate alınmadığı Referans deneyde yer hareketinin büyüklüğü arttıkça katlardaki ivme büyütme faktörlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Bu durumun azalan rijitliğe bağlı olduğu ve geçmiş yıllarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çarpışmanın dikkate alındığı deney numunelerinde ise ivme büyütme faktörlerinin her iki kat düzeyinde de etkileşim nedeniyle önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

➤ Kat ivmeleri, yapısal ve yapısal olmayan elemanlara uygulanan sismik kuvvetlerin önemli bir göstergesi olup, katlardaki ivmeölçerlerden elde edilen ivme değerleri kat ve taban kesme kuvvetleri ile ilişkilendirilmektedir. Komşu binalar arasındaki çarpışmadan kaynaklı ivme değerlerinde gözlemlenen bu artışlar kat ve taban kesme kuvvetlerinde önemli artışlara neden olmaktadır. Bu ise çarpışma etkilerinin tasarım sırasında dikkate alınmaması durumunda olası depremlerde beklenenden çok daha büyük yapısal tepkilerin meydana gelebileceğini ve yapısal elemanlarda beklenmedik hasarların oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca ivme tepkilerinde çarpışmadan kaynaklı oluşan ani piklerin varlığı, ivmeye duyarlı yapısal olmayan elemanlar ve özellikle hassas ekipmanları barındıran binalar için kritik etkilere neden olabilir.

➤ Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı referans deney ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri kıyaslandığında,

çarpışma nedeniyle etkileşimin olduğu yönde yer değiştirme değerleri genellikle azalmaktadır. Özellikle uygulanan yer hareketinin büyüklüğünün artmasıyla birlikte bu etki daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

➤ Etkileşimin olmadığı serbest yönde yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde ise çarpışma etkileri nedeniyle bu yönde de yer değiştirme değerlerinde azalmaların meydana geldiği söylenebilir. Ancak her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3 ve Deney-4'te etkileşim olmadığı serbest yönde daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen kat ivme değerleri diğer çarpışma türlerine kıyasla daha büyüktür. Kat ivmeleri ile orantılı olarak artan çarpışma kuvvetlerinin aktarılan enerjiyi artırması, etkileşimin olmadığı serbest yönde daha yüksek yer değiştirme taleplerine neden olmaktadır.

➤ Çarpışma etkileri altında yapısal davranışta meydana gelen değişimleri anlamlı bir şekilde değerlendirmek için, yer değiştirmeler yerine görel kat öteleme oranları karşılıklı olarak incelenmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde 1. ve 2. kat seviyelerinde elde edilen en büyük görel kat öteleme oranı (yönlerden bağımsız olarak) %25 Erzincan depremi için %0.26-%0.18, %50 Erzincan depremi için %0.51-%0.37, %75 Erzincan depremi için %%1.13-%1.24, %100 Erzincan depremi için %2.25-%1.95 ve %100 Parkfield depremi için %2.90-%2.35 olarak elde edilmiştir.

➤ Referans deney sonuçları ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deney sonuçları kıyaslandığında, etkileşimin olduğu yönde görel kat öteleme oranları (farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türünün incelendiği Deney-2 hariç) çarpışma nedeniyle genellikle azalmaktadır. Deney-2'de etkileşimin sadece 1. kat düzeyinde olması nedeniyle yer hareketi büyüklüğü arttıkça (%50 Erzincan, %75 Erzincan depremleri) 2. kat görel öteleme oranları da diğer çarpışmalara kıyasla oldukça artmaktadır. %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremleri sonrasında Deney-2'de 2. kat görel kat öteleme oranları, referans deneyde dahil olmak üzere diğer deneylerden elde edilenlere göre çok daha büyüktür. Etkileşimin olduğu yönde, %100 Erzincan ve %100 Parkfield depremlerinde 2. kat görel kat öteleme oranları referans deneye kıyasla %22.04 ve %20.64 arttığı tespit edilmiştir.

➤ Çarpışmanın olmadığı serbest yönde, en küçük görel kat öteleme oranları kolon-döşeme etkileşiminin dikkate alındığı Deney-1'de ve farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması türünün incelendiği Deney-2'de elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme seviyesinde çarpışma etkilerinin dikkate alındığı Deney-3 ve Deney-4'te diğer çarpışma türlerine göre daha büyük görel kat öteleme oranları elde edilmiştir.

➤ Çarpışma testleri sırasında test numunelerinin histerezis tepkilerini takip etmek ve komşu binalar arasındaki etkileşimin yapısal davranış üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri ele alınmıştır. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deney numunesi, klasik yalın çerçeve davranış sergilediğini ve düşük yük seviyelerinde bile büyük yer değiştirmeler yaparak doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmüştür. %25 Erzincan ve %50 Erzincan depremlerinde doğrusal davranış görülürken, artımlı olarak uygulanan sonraki deneylerde doğrusal olmayan davranış gözlemlenmiştir.

➤ Çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deneylerde elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde ise komşu binalar arasındaki çarpışmaların yapısal davranış üzerinde kritik etkileri olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, çarpışma nedeniyle yer-değiştirmelerin ani bir şekilde sınırlandırıldığı ve taban kesme kuvvetlerinin önemli düzeyde arttığı görülmektedir.

➤ Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı Referans deneyde elde edilen en büyük taban kesme kuvveti %25 Erzincan depremi için 7.14kN, %50 Erzincan depremi için 12.13kN, %75 Erzincan depremi için 19.29kN, %100 Erzincan depremi için 25.45kN ve %100 Parkfield depremi için 27.66kN olarak elde edilmiştir. Referans deney ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı deney sonuçları kıyaslandığında ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının (kolon-döşeme etkileşimi) incelendiği deneylerde %25 Erzincan depremi için en büyük taban kesme kuvveti, %4.62 azalırken, %50 Erzincan depremi için %33.80, %75 Erzincan depremi için %86.26, %100 Erzincan depremi için %118.70 ve %100 Parkfield depremi için %100.33 artmıştır.
- Farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının (tek katta döşeme-döşeme çarpışması) dikkate alındığı Deney-2’de bu artış %25 Erzincan depremi için %3.22, %50 Erzincan depremi için %23.74, %75 Erzincan depremi için %80.82, %100 Erzincan depremi için %75.05 ve %100 Parkfield depremi için %71.33 olarak hesaplanmıştır.
- Her iki katta döşeme-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Deney-3’te Referans deneye kıyasla taban kesme kuvvetlerindeki artışlar %68.07-%218.66 arasında değişmektedir.

- Çarpışma bölgelerine kauçuk levhalar teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde ise taban kesme kuvvetlerinde meydana gelen artışlar, %25 Erzincan depremi için %10.08, %50 Erzincan depremi için %57.87, %75 Erzincan depremi için %111.66, %100 Erzincan depremi için %130.45 ve %100 Parkfield depremi için %143.35 olarak elde edilmiştir.

➤ Kauçuk levhanın çarpışma etkilerini azaltmadaki etkinliğini araştırmak amacıyla Deney-3 ve Deney-4'e ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, kauçuk levhaların taban kesme kuvvetlerini %25 Erzincan depremi için %52.67, %50 Erzincan depremi için %54.36, %75 Erzincan depremi için %25.47, %100 Erzincan depremi için %21.27 ve %100 Parkfield depremi için %30.94 azalttığı görülmektedir.

➤ Her bir sarsma masası deneyi öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda, artan hasar ile birlikte tüm deney numunelerine ait doğal titreşim frekanslarında önemli azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alındığı ve alınmadığı tüm deneylerde %25 Erzincan depremi sonrasında frekanslarda azalma miktarı %5.00'in üzerinde olmuştur. Bu deprem sonucunda en az değişim Referans deneyde meydana gelmiş olup ilk iki moda ait frekans değerleri %5.97 ve %6.41 oranında azalmıştır.

➤ Sarsma masası deneyleri sonucunda, hasarsız duruma göre ilk iki moda ait frekanslardaki nihai azalma oranları Referans deney için %31.05-%36.54, Deney-1 için %33.27-%36.64, Deney-2 için %35.59-%41.20, Deney-3 için %37.51-%32.85 ve Deney-4 için %30.70-%33.90 olarak elde edilmiştir. Frekans değerleri karşılaştırıldığında, hasarla birlikte en büyük değişimler genellikle aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği Deney-3'te elde edilmiştir.

➤ Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen frekans değişim değerleri kıyaslandığında, kauçuk levhaların çarpışma hasarlarını azaltma konusunda etkili olabileceği görülmektedir.

➤ Artan hasarla birlikte sönüm oranı değerlerinin artma eğilimi gösterdiği ve bu değerlerde frekans değerlerine kıyasla daha büyük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.

➤ Her bir sarsma masası deneyi sonrasında hasarlı durumdaki frekans değerleri ile hasarsız duruma ait frekans değerleri kullanılarak elde edilen hasar indeksleri kıyaslandığında, çarpışma etkilerinin hasar indekslerini önemli ölçüde artırma potansiyeli olduğu görülmektedir. Özellikle aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışmasının incelendiği

deneyde Referans deneye kıyasla hasar indekslerinde ilk mod için %189.93 ve ikinci mod için %78.18'e ulaşan artışların meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde farklı kat yüksekliğine sahip binaların çarpışmasının incelendiği deneyde ilk mod için %46.51 ve ikinci mod için %33.90'a ulaşan artışlar gözlenmiştir.

➤ Deney-3 ve Deney-4'te elde edilen veriler kıyaslandığında çarpışma bölgelerine yerleştirilen kauçuk levhaların hasarları azaltma konusunda etkili olabileceğini ve hasar indekslerinde %66.74'e varan azalmalar sağladığı tespit edilmiştir.

➤ %25 ve %50 Erzincan depremleri sonrasında tüm deney numunelerinin MGK değerlerinde önemli değişimler meydana gelmemiştir. Ancak artan yer hareketi büyüklüğüyle birlikte MGK değerlerinde belirgin azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu azalmalar hasarın varlığını ortaya koymaktadır. Referans deney numunesi ile çarpışma etkilerinin dikkate alındığı numunelerdeki MGK değerlerinin değişimi incelendiğinde, çarpışmanın neden olduğu hasarların yapıların mod şekilleri üzerinde kritik etkileri olduğu görülmektedir.

➤ Sarsma masası deneylerinde, temel ve kolon arayüzünde ayrılmaların tüm numunelerde oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıktığı ve bu bölgelerdeki ölçüm noktalarından elde edilen 1-KMGK değerlerindeki artışın mevcut hasarlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Artan yer hareketi büyüklüğüyle birlikte artan hasarlar, farklı ölçüm noktalarının 1-KMGK değerlerinde artışlar meydana getirmiştir.

➤ Kat yükseklikleri farklı binaların çarpışmasının incelendiği Deney-1'de çarpışma nedeniyle ortaya çıkan kesme kuvvetleri kolonlarda önemli hasarlara neden olmuştur. %100 Erzincan depreminin uygulandığı 4. sarsma masası deneyi sonrasında 2. katta çarpışmanın olduğu kolonda yaklaşık 45° açığa sahip kesme çatlakları meydana gelmiştir. %100 Parkfield depremi ile gerçekleştirilen testler sonrasında çarpışmanın olduğu kolondaki mevcut kesme çatlaklarının genişliği önemli ölçüde artmıştır. Buna ek olarak çarpışma nedeniyle yeni kesme hasarları da oluşmuştur. Geçmiş yıllarda meydana gelen depremlere benzer şekilde bu çarpışma türü diğer çarpışma türlerine kıyasla daha yıkıcı etkilere sahiptir.

➤ Farklı yüksekliğe sahip komşu binalar arasındaki çarpışmaların incelendiği Deney-2'de etkileşim sadece 1. kat seviyesinde gerçekleşmiştir. Sarsma masası testleri sırasında 1. katın yer değiştirmeleri çarpışma nedeniyle ani bir şekilde sınırlandırılırken, 2. katta büyük göreli kat ötelemeleri meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu deneyde hasarların 2. kat taşıyıcı sistem elemanlarında yoğunlaştığı söylenebilir. Sarsma masası deneyleri sonunda, çarpışmanın olduğu yöndeki 2. kat kolonun alt ucunda çatlak genişlikleri önemli ölçüde

artmış ve betonda dökülmeler meydana gelmiştir. Ayrıca çarpışma nedeniyle hareketin engellendiği 1. kat döşeme seviyesi ile 2. kat kolon arayüzünde ayrılmalar oldukça belirgin hale gelmiştir. 2. kat kolonlarında meydana gelen bu hasarlar diğer deneylerde oluşmamıştır.

➤ Aynı yüksekliğe sahip komşu binalar arasındaki çarpışma etkilerinin incelendiği Deney-3'te, çarpışmanın her iki kat seviyesinde de gerçekleşmesi sebebiyle diğer çarpışma türlerine kıyasla kolon hasarları daha azdır. Ancak kat ivmelerini ve taban kesme kuvvetlerini diğer çarpışma türlerine kıyasla önemli ölçüde artıran bu çarpışma türünde temel-1. kat kolon ve 1. kat döşeme-2. kat kolon arayüzlerinde önemli ayrılmaların meydana geldiği görülmüştür. Döşeme seviyesindeki hareketin çarpışma nedeniyle ani bir şekilde durdurulması 2. kat kolon üst uçlarındaki çatlak kalınlıklarının diğer çarpışma türlerine kıyasla daha fazla artmasına neden olmuştur.

➤ Binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak için bina ile rijit çarpışma duvarı arasına kauçuk sönümleyiciler teşkil edilerek gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde Deney-3'e benzer şekilde hasarlar elde edilmiştir. Her iki katta döşeme-döşeme etkileşimi dikkate alınması sebebiyle diğer çarpışma türlerine kıyasla kolon hasarları daha azdır.

DeneySEL çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ışığında konu ile alakalı yapılan öneriler aşağıda sunulmuştur:

➤ Tez kapsamında deney numunesi ile çarpışma elemanı arasındaki derz mesafesi, dikkate alınan tüm yer hareketlerinde çarpışmayı sağlayacak şekilde tek bir değer seçilmiştir. Binalar arasındaki derz mesafesinin çarpışma kuvvetlerine ve çarpışma hasarlarına olan etkileri deneySEL yöntemlerle araştırılabilir. Böylece yeni deprem yönetmeliklerinde derz mesafeleri için önerilerin yapılması sağlanabilir.

➤ Üç boyutlu deney numuneleri kullanılarak eksantrik çarpışma, noktasal çarpışma ve ikiden çok binanın çarpışması türleri üzerine de deneySEL çalışmalar yürütülebilir.

➤ Çarpışma etkilerinin, ivmeye duyarlı yapısal olmayan elemanlara ve ekipmanlara (asma tavan sistemleri, yangın sprinkler boruları, aydınlatma armatürleri ve mekanik ekipmanlar) sahip binaların tepkilerine ve bu ekipmanların davranışları üzerine olan yıkıcı etkileri ele alınabilir.

➤ Parametrik çalışmalar yürütülerek komşu binaların dinamik karakteristiklere bağlı olarak binalar arasında bırakılması gereken boşluk oranları için öneriler yapılabilir ve mevcut deprem yönetmeliğinde verilen derz mesafelerinin yeterliliği ele alınabilir.

➤ Taban izolasyonuna sahip binaların çevre duvarı ile arasındaki çarpışma etkileri deneysel yöntemlerle ele alınabilir ve bu etkileri azaltmak amacıyla yöntem ve teknikler araştırılabilir.

➤ Tez kapsamında komşu binalar arasında çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla kauçuk levhalar kullanılmıştır. Bu kauçuk levhaların çarpışma etkilerini azaltma konusundaki etkinliklerinin artırılması amacıyla çeşitli boyut, şekil faktörü ve sertliklere sahip kauçuk levhalar ele alınarak deneysel çalışmalar yürütülebilir.

➤ Çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla komşu binalar arasında kullanılacak farklı yöntemler sarsma masası deneyleri ile test edilebilir. Bu amaçla viskoz sönümleyiciler, yaylar, rijit bağlantı elemanları ve polimer malzemeler kullanılabilir. Ayrıca bunların yapılarda nerelere konulacağı üzerine çalışmalar yürütülebilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdeddaim, M., Ounis, A., Djedoui, N. ve Shrimali, M., K., 2016. Pounding Hazard Mitigation between Adjacent Planar Buildings using Coupling Strategy, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6, 3, 603-617.
- ABYYHY., 1975. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 32 s.
- Achter, J.L., 2000. Full-Scale Bridge Bent Condition Assessment using Forced-Vibration Testing, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Logan, Utah.
- Ahmad, N., Shahzad, A., Rizwan, M., Khan, A., N., Ali, S., M., Ashraf, M., Naseer, A., Ali, Q. ve Alam, B., 2019. Seismic Performance Assessment of Non-Compliant SMRF-Reinforced Concrete Frame: Shake-Table Test Study, Journal of Earthquake Engineering, 23, 3, 444-462.
- Akhlaghi, M., M., Bose, S., Mohammadi, M., E., Moaveni, B., Stavridis, A. ve Wood, R., L., 2021. Post-Earthquake Damage Identification of an RC School Building in Nepal using Ambient Vibration and Point Cloud Data, Engineering Structures, 227, 111413.
- Akpınar, M., 2019. Yapıların Sismik Davranışının Çekiçleme Etkisi ve Zemin Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Altunışık, A., C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Altunışık, A., C., Bayraktar, A., Sevim, B., Kartal, M., E. ve Adanur, S., 2010. Finite Element Model Updating of an Arch Type Steel Laboratory Bridge Model Using Semi-Rigid Connection, Steel and Composite Structures, 10, 6, 541-561.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2017. Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam, Engineering Failure Analysis, 79, 154-170.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y., Genç, A., F., Günaydın, M. ve Karahasan, O., 2018. Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures, Experimental Techniques, 42, 6, 605-621.

- Altunışık, A., C., Okur, F., Y., Karaca, S. ve Kahya, V., 2019a. Vibration-Based Damage Detection in Beam Structures with Multiple Cracks: Modal Curvature vs. Modal Flexibility Methods, Nondestructive Testing and Evaluation, 34, 1, 33-53.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2019b. Vibrations of a Box-Sectional Cantilever Timoshenko Beam with Multiple Cracks, International Journal of Steel Structures, 19, 2, 635-649.
- Anagnostopoulos, S., A. ve Spiliopoulos, K., V., 1992. An Investigation of Earthquake Induced Pounding between Adjacent Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 4, 289-302.
- Andreaus, U., Baragatti, P., De Angelis, M. ve Perno, S., 2017. Shaking Table Tests and Numerical Investigation of Two-Sided Damping Constraint for End-Stop Impact Protection, Nonlinear Dynamics, 90, 4, 2387-2421.
- Arnold, C., 1985. Pounding damage at Hotel de Carlo, The Earthquake Engineering Online Archive NISEE e-Library.
- AS1170.4, 2007. Structural design actions Part 4: Earthquake actions in Australia, Standards Australia.
- A.S.C.E., 2016. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 800 s.
- Ateş, S., 2018. Bitişik Nizam Yapıların Farklı Kat Seviyelerindeki Çarpışma Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aydın, E., Öztürk, B., Çetin, H. ve Şimşek, T., 2017. Application of Viscous Dampers for Prevention of Pounding in Adjacent Reinforced Concrete Buildings, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile.
- Baghiee, N., Esfahani, M., R. ve Moslem, K., 2009. Studies on Damage and FRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Vibration Monitoring, Engineering Structures, 31, 4, 875-893.
- Barbato, M., ve Tubaldi, E., 2013. A Probabilistic Performance-Based Approach for Mitigating the Seismic Pounding Risk between Adjacent Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42, 8, 1203-1219.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009. Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 81-89.
- Bendat, J. ve Piersol, A., 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.

- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Birdal, F., 2015. Betonarme Yapıların Sismik Davranışlarının Sarsma Tablasında Deneysel Olarak İncelenmesi ve Analitik Olarak Modellenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA.
- Brown, T. ve Elshaer, A., 2022. Pounding of Structures at Proximity: A state-of-the-Art Review, Journal of Building Engineering, 48, 103991.
- Caetano, E., 2000. Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto.
- Cao, M., S., Sha, G., G., Gao, Y., F. ve Ostachowicz, W., 2017. Structural Damage Identification using Damping: A Compendium of Uses and Features, Smart Materials and Structures, 26, 4, 043001.
- Chau, K., T. ve Wei, X., X., 2001. Pounding of Structures Modelled as Non-Linear Impacts of Two Oscillators, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 5, 633-651.
- Chau, K., T., Wei, X., X., Guo, X. ve Shen, C., Y., 2003. Experimental and Theoretical Simulations of Seismic Poundings between Two Adjacent Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 4, 537-554.
- Chau, K., T., Wei, X., X., Shen, C., Y. ve Wang, L., X., 2004. Experimental and Theoretical Simulations of Seismic Torsional Poundings between Two Adjacent Structures, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Chau, K., T., Wang, L., X. ve Wei, X., X., 2006. Torsional Poundings between Two Adjacent Asymmetric Structures, 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.
- Chenna, R. ve Ramancharla, P., K., 2018. Damage Assessment due to Pounding between Adjacent Structures with Equal and Unequal Heights, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 8, 4, 635-648.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2012. Pounding Damage to Buildings and Bridges in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake, International Journal of Protective Structures, 3, 2, 123-139.

- Chuntavan, C., 1993. Structural Identification of Steel Stringer Bridges for Condition Assessment, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati.
- Cole, G., Dhakal, R., Carr, A., J. ve Bull, D., 2010a. Building Pounding State of the Art: Identifying Structures Vulnerable to Pounding Damage. Proceedings of New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Conference, New Zealand.
- Cole, G., Dhakal, R., Carr, A. ve Bull, D., 2010b. Interbuilding Pounding Damage Observed in the 2010 Darfield Earthquake, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 43, 4, 382-386.
- Cole, G., L., Dhakal, R., P. ve Turner, F., M., 2012. Building Pounding Damage Observed in the 2011 Christchurch Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41, 5, 893-913.
- Crozet, V., Politopoulos, I., Yang, M., Martinez, J., M. ve Erlicher, S., 2017. Influential Structural Parameters of Pounding between Buildings during Earthquakes, Procedia Engineering, 199, 1092-1097.
- Crozet, V., Politopoulos, I. ve Chaudat, T., 2019. Shake Table Tests of Structures subject to Pounding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 48, 10, 1156-1173.
- Cui, L., L., Guo, A., X. ve Li, H., 2011. Investigation of the Parameters of Hertz Impact Model for the Pounding Analysis of Highway Bridge, Procedia Engineering, 14, 2773-2778.
- Çaycı, B., T. ve Akpınar, M., 2021. Seismic Pounding Effects on Typical Building Structures Considering Soil-Structure Interaction, Structures, 34, 1858-1871.
- Çetinkaya, G., 2011. Deprem Yer Hareketine Maruz Komşu Binaların Çarpışma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- DBYBHY., 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 159 s.
- Demir, S., Günaydın, M., Atmaca, B., Altunışık, A., C., Hüsem, M., Adanur, S., Angın, Z. ve Ateş, Ş., 2021. Performance Evaluation of Reinforced Concrete Buildings During the Sivrice-Elazığ Earthquake (Mw= 6. 8, January 24, 2020) in Accordance with Turkish Earthquake Code, Journal of Earthquake and Tsunami, 15, 4, 2150018.
- Dertli, H., H., 2017. Deprem Bölgelerine Göre Komşu Binalarda Çarpışma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Dertli, H., H., Sunca, F. ve Akköse, M., 2017. Pounding Response between RC Buildings with Equal Heights and Different Dynamic Characteristics Considering Seismic Zone 1 of Turkey, Nevşehir Journal of Science and Technology, 6, 362-370.
- DiPasquale, E. ve Cakmak, A., S., 1988. Identification of the Serviceability Limit State and Detection of Seismic Structural Damage, National Center for Earthquake Engineering Research, New York, USA.
- DiPasquale, E., Ju, J., W., Askar, A. ve Çakmak, A., S., 1990. Relation between Global Damage Indices and Local Stiffness Degradation, Journal of Structural Engineering, 116, 5, 1440-1456.
- Doebbling, S., W., Farrar C., R. ve Prime, M., B., 1998. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, 30, Thousands Oaks, Ca, Etats-Unis: Sage.
- Doğan, M. ve Günaydın, A., 2009. Pounding of Adjacent RC Buildings during Seismic Loads, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 1, 129-145.
- Du, H., Wang, Y., Han, M. ve Ibarra, L., F., 2021. Experimental Seismic Performance of a Base-Isolated Building with Displacement Limiters, Engineering Structures, 244, 112811.
- Du, H., Han, M., Wang, H., Wang, Y., Jiang, J. ve Yu, J., 2022. Impact Model and Computational Analysis of Structural Isolation Layer Deformation Limitation with Limiters, Structures, 40, 176-186.
- Efraimiadou, S., Hatzigeorgiou, G., D. ve Beskos, D., E., 2013. Structural Pounding between Adjacent Buildings subjected to Strong Ground Motions. Part I: The Effect of Different Structures Arrangement, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42, 10, 1509-1528.
- Ehab, M., Salem, H., Mostafa, H. ve Yehia, N., 2014. Earthquake Pounding Effect on Adjacent Reinforced Concrete Buildings, International Journal of Computer Applications, 106, 9, 27-34.
- El-Khoriby, S., Seleemah, A., Elwardany, H. ve Jankowski, R., 2015. Experimental and Numerical Study on Pounding of Structures in Series. Advances in Structural Engineering, 1073-1089.
- Elwardany, H., Seleemah, A. ve Jankowski, R., 2017. Seismic Pounding Behavior of Multi-Story Buildings in Series Considering the Effect of Infill Panels, Engineering Structures, 144, 139-150.
- Elwardany, H., Jankowski, R. ve Seleemah, A., 2021. Mitigating the Seismic Pounding of Multi-Story Buildings in Series using Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21, 4, 1-16.

- Ertürk, E., Aykanat, B., Altunışık, A., C. ve Arslan, M., E., 2022. Seismic Damage Assessment Based on Site Observation Following the Düzce (Gölyaka) Earthquake (Mw = 5.9, November 23, 2022), Journal of Structural Engineering and Applied Mechanics, 5, 4, 197-221.
- Eurocode 8., 2005. Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 231 s.
- Farahani, D., Behnamfar, F., Sayyadpour, H. ve Ghandil, M., 2019. Seismic Impact between Adjacent Torsionally Coupled Buildings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 117, 81-95.
- Favvata, M., J., 2017. Minimum Required Separation Gap for Adjacent RC Frames with Potential Inter-Story Seismic Pounding, Engineering Structures, 152, 643-659.
- Flores, F., X., Lopez-Garcia, D. ve Charney, F., A., 2015. Assessment of Floor Accelerations in Special Steel Moment Frames, Journal of Constructional Steel Research, 106, 154-165.
- Filiatrault, A., Cervantes, M., Folz, B. ve Prion, H., 1994. Pounding of Buildings during Earthquakes: A Canadian Perspective, Canadian Journal of Civil Engineering, 21, 2, 251-265.
- Filiatrault, A., Wagner, P. ve Cherry, S., 1995. Analytical Prediction of Experimental Building Pounding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 8, 1131-1154.
- Garcia, D., L., 2004. Separation Distance Necessary to Prevent Seismic Pounding between Adjacent Structures, Doktora Tezi, University of New York, Buffalo.
- Garcia, D., L., 2005. Discussion on: Critical Building Separation Distance in Reducing Pounding Risk under Earthquake Excitation, Structural Safety, 4, 27, 393-396.
- Garcia, R., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., Helal, Y., Jemaa, Y., Pilakoutas, K., Mongabure, P., Chrysostomou, C., Nicholas Kyriakides, N., Ilki, A., Budescu, M., Taranu, N., Ciupala, M., A., Torres, L. ve Saiidi, M., 2014. Full-Scale Shaking Table Tests on a Substandard RC Building Repaired and Strengthened with Post-Tensioned Metal Straps, Journal of Earthquake Engineering, 18, 2, 187-213.
- Garcia, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., Kyriakides, N. ve Ciupala, M., A., 2017. Seismic Retrofitting of RC Buildings using CFRP and Post-Tensioned Metal Straps: Shake Table Tests, Bulletin of Earthquake Engineering, 15, 8, 3321-3347.

- Genç, A., F., Ergün, M., Günaydın, M., Altunışık, A., C., Ateş, Ş., Okur, F., Y. ve Mosallam, A., S., 2019. Dynamic Analyses of Experimentally-Updated FE Model of Historical Masonry Clock Towers using Site-Specific Seismic Characteristics and Scaling Parameters according to the 2018 Turkey Building Earthquake Code, Engineering Failure Analysis, 105, 402-426.
- Ghandil, M. ve Aldaikh, H., 2017. Damage-Based Seismic Planar Pounding Analysis of Adjacent Symmetric Buildings Considering Inelastic Structure–Soil–Structure Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46, 7, 1141-1159.
- Gökdemir, H., 2019. Failure of Horizontal Support System to Adjacent Buildings during Reconstruction in Eskisehir, Engineering Failure Analysis, 103, 82-94.
- Guo, A., Zhao, Q. ve Li, H., 2012. Experimental Study of a Highway Bridge with Shape Memory Alloy Restrainers Focusing on the Mitigation of Unseating and Pounding, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 11, 2, 195-204.
- Güler, S., 2018. Betonarme yapılarda sismik çarpışma etkisinin azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Günaydın, M., 2016. Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve Bayraktar, A., 2017. Finite Modeling Updating Effects on the Dynamic Response of Building Models, Journal of Testing and Evaluation, 45, 5, 1630-1649.
- Hao, H., 2015. Analysis of Seismic Pounding between Adjacent Buildings, Australian Journal of Structural Engineering, 16, 3, 208-225.
- Harris, H., G. ve Sabnis, G., 1999. Structural Modelling and Experimental Techniques, 2nd edition, CRC Press LLC, Boca Raton Florida, 808 s.
- He, J., Jiang, Y., Xue, Q., Zhang, C. ve Zhang, J., 2018. Effectiveness of using Polymer Bumpers to Mitigate Earthquake-Induced Pounding between Buildings of Unequal Height, Advances in Civil Engineering, 2018.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universiteit, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Hong, H., P., Wang, S., S. ve Hong, P., 2003. Critical Building Separation Distance in Reducing Pounding Risk under Earthquake Excitation, Structural Safety, 25, 3, 287-303.

- Hong, H., P., Wang, S., S. ve Hong, P., 2005. Reply to Discussion on “Critical Building Separation Distance in Reducing Pounding Risk under Earthquake Excitation”, Structural Safety, 4, 27, 397-398.
- Hosseini, S., H., Naderpour, H., Vahdani, R. ve Jankowski, R., 2022. Evaluation of Pounding Effects between Reinforced Concrete Frames subjected to Far-Field Earthquakes in terms of Damage Index, Bulletin of Earthquake Engineering, 20, 2, 1219-1245.
- Hou, R. ve Xia, Y., 2021. Review on the New Development of Vibration-Based Damage Identification for Civil Engineering Structures: 2010–2019, Journal of Sound and Vibration, 491, 115741.
- Hüsem, M., 2022. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- İnel, M., Özmen, H., B. ve Çaycı, B., T., 2013. Simav ve Van Depremlerinin (2011) Yapı Hasar Nedenlerinin Değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 6, 256-265.
- 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.
- Jamal, K., A. ve Vidyadhara, H., S., 2013. Seismic Pounding of Multistoreyed Buildings, Moment, 15, 2, 12-17.
- 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 and Structural Dynamics, 39, 3, 343-354.
- Jankowski, R., 2012. Non-Linear FEM Analysis of Pounding-Involved Response of Buildings under Non-Uniform Earthquake Excitation, Engineering Structures, 37, 99-105.
- Jankowski, R. ve Mahmoud, S., 2016. Linking of Adjacent Three-Storey Buildings for Mitigation of Structural Pounding during Earthquakes, Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 11, 3075-3097.
- Jeng, V., Kasai, K. ve Maison, B., F., 1992. A Spectral Difference Method to Estimate Building Separations to Avoid Pounding, Earthquake Spectra, 8, 2, 201-223.
- Jiang, S., Zhai, C. ve Liu, Y., 2022. Experimental and Numerical Studies of Seismic Induced Story-to-Story and Inter-Story Pounding, Structures, 46, 555-569.

- Jiao, C., Liu, W., Wu, S., Gui, X., Huang, J., Long, P. ve Li, W., 2021. Shake Table Experimental Study of Curved Bridges with Consideration of Girder-to-Girder Collision, Engineering Structures, 237, 112216.
- Kamal, M., İnel, M. ve Çaycı, B., T., 2018. Düşük ve Orta Yükseklikteki Binalarda Çekişleme Etkisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler, 6, 141-151.
- Kamal, M. ve İnel, M., 2022a. Simplified Approaches for Estimation of Required Seismic Separation Distance between Adjacent Reinforced Concrete Buildings, Engineering Structures, 252, 113610.
- Kamal, M. ve İnel, M., 2022b. A New Equation for Prediction of Seismic Gap Between Adjacent Buildings Located on Different Soil Types, Journal of Building Engineering, 57, 104784.
- Kamal, M., İnel, M. ve Çaycı, B., T., 2022. Seismic Behavior of Mid-Rise Reinforced Concrete Adjacent Buildings Considering Soil-Structure Interaction, Journal of Building Engineering, 51, 104296.
- Karabork, T. ve Aydın, E., 2019. Optimum Design of Viscous Dampers to Prevent Pounding of Adjacent Structures, Earthquakes and Structures, 16, 4, 437-453.
- Karahasan, O., Ş., 2017. Betonarme Binaların Dinamik Davranışına Lifli Polimer Kompozit Malzeme Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karayannis, C., G. ve Naoum, M., C., 2018. Torsional Behavior of Multistory RC Frame Structures due to Asymmetric Seismic Interaction, Engineering Structures, 163, 93-111.
- Karayel, V., 2016. Çapraz Yay Gruplarını Kullanan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kasai, K. ve Maison, B., F., 1991. Observation of Structural Pounding Damage from 1989 Loma Prieta Earthquake, 6th Canadian Conference of Earthquake Engineering, 735-742.
- Kasai, K., Jagiasi, A., R. ve Jeng, V., 1996. Inelastic Vibration Phase Theory for Seismic Pounding Mitigation, Journal of Structural Engineering, 122, 10, 1136-1146.
- Kasai, K. ve Maison, B., F., 1997. Building Pounding Damage during the 1989 Loma Prieta Earthquake, Engineering Structures, 19, 3, 195-207.
- Khan, F., A., Khan, S., W., Rashid, M., Rizwan, M., Fahim, M., Shahzada, K., Ahmad, N., Badrashi, Y., I., Qazi, S. ve Said, I., 2021. Evaluation of Code Compliant/Non-Compliant ECC-RC IMRF Structures, Structures, 32, 1634-1645.

- Khan, I., Shahzada, K., Bibi, T., Ahmed, A. ve Ullah, H. 2021. Seismic Performance Evaluation of Crumb Rubber Concrete Frame Structure using Shake Table Test, Structures, 30, 41-49.
- Kharazian, A., López Almansa, F., Benavent Climent, A. ve Gallego Molina, A., 2018. Shaking Table Testing on Seismic Pounding of a RC Building Structure, Proceedings of the DINEST, Madrid.
- Khatewada, S. ve Chouw, N., 2013. A Shake Table Investigation on Interaction between Buildings in a Row, Coupled Systems Mechanics, 2, 2, 175-190.
- Khatewada, S., Chouw, N. ve 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.
- Khatewada, S., Chouw, N. ve Larkin, T., 2014. An Experimental Investigation on Contact Behaviour during Structural Pounding, New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Auckland.
- Khatami, S. M., Naderpour, H., Mortezaei, A., Sharbatdar, A., Lasowicz, N. ve Jankowski, R., 2022. The Effectiveness of Rubber Bumpers in Reducing the Effects of Earthquake-Induced Pounding between Base-Isolated Buildings, Applied Sciences, 12, 10, 4971.
- Kita, A., Cavalagli, N., Venanzi, I. ve Ubertini, F., 2021. A New Method for Earthquake-Induced Damage Identification in Historic Masonry Towers Combining OMA and IDA, Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 12, 5307-5337.
- Korkmaz, S., Z., 2015. Observations on the Van Earthquake and Structural Failures, Journal of Performance of Constructed Facilities, 29, 1, 04014033.
- Köksal, O. ve Karaca, Z., 2017. Patlatma Kaynaklı Yer Hareketi Etkisindeki Bitişik Nizam Yapıların Çarpışma Analizi, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir.
- Li, B., Bi, K., Chouw, N., Butterworth, J., W. Ve Hao, H., 2012. Experimental Investigation of Spatially Varying Effect of Ground Motions on Bridge Pounding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41, 14, 1959-1976.
- Li, S., Zuo, Z., Zhai, C., Xu, S. ve Xie, L., 2016. Shaking Table Test on the Collapse Process of a Three-Story Reinforced Concrete Frame Structure, Engineering Structures, 118, 156-166.
- Li, N., Xu, W., Chen, Y. ve Yan, W., 2019. Experimental Research on Adjacent Pounding Effect of Midspan Curved Bridge with Longitudinal Slope, Engineering Structures, 196, 109320.

- Li, X., Zhang, F., Tian, K., Wang, Z., Jiang, L. ve Dong, J., 2021. Shaking Table Test for Externally-Hung Self-Centering Rocking Wall Structure, Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2, 863-887.
- Licari, M., Sorace, S. ve Terenzi, G., 2015. Nonlinear Modeling and Mitigation of Seismic Pounding between R/C Frame Buildings, Journal of Earthquake Engineering, 19, 3, 431-460.
- Lin, J. ve Mahin, S., A., 1985. Seismic Response of Light Subsystems on Inelastic Structures, Journal of Structural Engineering, 111, 2, 400-417.
- Lin, J., H. ve Weng, C., C., 2002. A Study on Seismic Pounding Probability of Buildings in Taipei Metropolitan Area, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 25, 2, 123-135.
- Lin, J., H., 2005. Evaluation of Seismic Pounding Risk of Buildings in Taiwan, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 28, 5, 867-872.
- Lopez-Garcia, D. ve Soong, T., T., 2009a. Evaluation of Current Criteria in Predicting the Separation Necessary to Prevent Seismic Pounding between Nonlinear Hysteretic Structural Systems, Engineering Structures, 31, 5, 1217-1229.
- Lopez-Garcia, D. ve Soong, T., T., 2009b. Assessment of the Separation Necessary to Prevent Seismic Pounding between Linear Structural Systems, Probabilistic Engineering Mechanics, 24, 2, 210-223.
- Makita, K., Uda, Y., Yoshikado, H., Mori, K., Sato, Y. ve Kaneko, Y., 2018. Drop-Weight Test for RC Frame Made of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 16, 1, 36-45.
- Mazza, F. ve Labernarda, R., 2020. Magnetic Damped Links to Reduce Internal Seismic Pounding in Base-Isolated Buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 18, 15, 6795-6824.
- Mazza, F. ve Labernarda, R., 2022. Effects of Near-Fault Acceleration and Non-Acceleration Pulses on Pounding between In-Plan Irregular Fixed-Base and Base-Isolated Buildings, Structural Control and Health Monitoring, e2992.
- Miari, M., Choong, K., K. ve Jankowski, R., 2019. Seismic Pounding between Adjacent Buildings: Identification of Parameters, Soil Interaction Issues and Mitigation Measures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121, 135-150.
- Miari, M. ve Jankowski, R., 2022a. Shaking Table Experimental Study on Pounding Between Adjacent Structures Founded on Different Soil Types, Structures, 44, 851-879.
- Miari, M. ve Jankowski, R., 2022b. Analysis of Floor-to-Column Pounding of Buildings Founded on Different Soil Types, Bulletin of Earthquake Engineering, 20, 13, 7241-7262.

- Miglietta, M., Damiani, N., Guerrini, G. ve Graziotti, F. 2021. Full-Scale Shake-Table Tests on Two Unreinforced Masonry Cavity-Wall Buildings: Effect of an Innovative Timber Retrofit, Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 6, 2561-2596.
- 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, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Nasery, M., Hüsem, M., Okur, F., Y. ve Altunışık, A., C., 2020. Damage Effect on Experimental Modal Parameters of Haunch Strengthened Concrete-Encased Composite Column–Beam Connections, International Journal of Damage Mechanics, 29, 2, 297-334.
- Ndambi, J., M., Vantomme, J. ve Harri, K., 2002. Damage Assessment in Reinforced Concrete Beams using Eigenfrequencies and Mode Shape Derivatives, Engineering Structures, 24, 4, 501-515.
- Ohta, R., Wijeyewickrema, A. ve C., Farahani, A., 2006. End Building Pounding during Earthquakes, Symposium on Infrastructure Development and the Environment, Quezon City, Philippines.
- Okur, F., Y., 2017. Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Özbayrak, A., 2017. Betonarme Yapılardaki Döşeme Süreksizliklerinin Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Özmen, H., B., İnel, M., Akyol, E. ve Çaycı, B., T., 2011. 19 Mayıs 2011 Kütahya Simav Depremi ve Artçı Sarsıntıları İnceleme Raporu, İMO Denizli Şubesi, Denizli.
- Pala, M., Tekin, O., F. ve Eşit, M., 2015. Yumuşak Kat Düzensizliğine Sahip Bitişik Nizam Binaların Deprem Kaynaklı Çarpışma Analizi, ISITES 2015, Valencia, Spain.
- Pala, M. ve 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.
- Papadrakakis, M. ve Mouzakis, H., P., 1995. Earthquake Simulator Testing of Pounding between Adjacent Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 6, 811-834.
- PEER, 2022. Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database, University of California, Berkeley.

- Penzien, J., 1997. Evaluation of Building Separation Distance Required to Prevent Pounding during Strong Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, 8, 849-858.
- Perera, R., Huerta, C. ve Orqui, J., M., 2008. Identification of Damage in RC Beams using Indexes based on Local Modal Stiffness, Construction and Building Materials, 22, 8, 1656-1667.
- Polycarpou, P., C., Papaloizou, L., Komodromos, P. ve Charmpis, D., C., 2015. Effect of the Seismic Excitation Angle on the Dynamic Response of Adjacent Buildings during Pounding, Earthquakes and Structures, 8, 5, 1127-1146.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Quintana-Gallo, P., Pampanin, S., Carr, A. J. ve Bonelli, P., 2010. Shake Table Tests of Under-Designed RC Frames for the Seismic Retrofit of Buildings—Design and Similitude Requirements of the Benchmark Specimen, Proceedings of the New Zealand Society of Earthquake Engineering, New Zealand.
- Radzieński, M., Krawczuk, M. ve Palacz, M., 2011. Improvement of Damage Detection Methods Based on Experimental Modal Parameters, Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 6, 2169-2190.
- Rajaram, C. ve Kumar, R., P., 2012. Comparison of Codal Provisions on Pounding between Adjacent Buildings, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 5, 1, 71-79.
- Raheem, S., E., A., 2013. Evaluation and Mitigation of Earthquake Induced Pounding Effects on Adjacent Buildings Performance, the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Jeju, Korea.
- Raheem, S., E., 2014. Mitigation Measures for Earthquake Induced Pounding Effects on Seismic Performance of Adjacent Buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 4, 1705-1724.
- Raheem, S., E., Fooly, M., Y., M., Abdel Shafy, A., G., A., Taha, A., M., Abbas, Y., A. ve Abdel Latif, M., M. S., 2019. Numerical Simulation of Potential Seismic Pounding Among Adjacent Buildings In Series, Bulletin of Earthquake Engineering, 17, 439-471.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Rezavani, A. ve Moghadam, A., S., 2004. Using Shaking Table to Study Different Methods of Reducing Effects of Buildings Pounding During Earthquake, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.

- Rezavandi, A. ve 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.
- Rodrigues, J., 2004. Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Rosenblueth, E. ve Meli, R., 1986. The 1985 Earthquake: Causes and Effects in Mexico City, Concrete International, 8, 5, 23-34.
- Rytter, A., 1993. Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures, Doktora Tezi, Aalborg University, Denmark.
- Sak, Ö., F. ve Beyen, K., 2017. Bitişik Nizam Betonarme Yapılarda Çarpışma Etkisi ve Zaman-Frekans Alanında Performans Analizleri, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, Türkiye.
- Salawu, O., S., 1997. Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review, Engineering Structures, 19, 9, 718-723.
- Salem, Y., S. ve Feng, M., 2008. Shake Testing of Frame Structures Retrofitted with Viscous Dampers to Mitigate Seismic Pounding, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Schwarz, B., J. ve Richardson, M., H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week, Orlando, USA.
- Sevil, T., Baran, M. ve Canbay, E., 2010. Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçeve Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel ve Kuramsal Çalışmalar, International Journal of Engineering Research and Development, 2, 2, 35-42.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Atamtürk, S. ve Birinci, F., 2011. Assessment of Nonlinear Seismic Performance of a Restored Historical Arch Bridge using Ambient Vibrations, Nonlinear Dynamics, 63, 4, 755-770.
- Sharma, A., Reddy, G., R. ve Vaze, K., K., 2012. Shake Table Tests on a Non-Seismically Detailed RC Frame Structure, Structural Engineering and Mechanics, 41, 1, 1-24.
- Shrestha, B., 2013. Effects of Separation Distance and Nonlinearity on Pounding Response of Adjacent Structures, International Journal of Civil and Structural Engineering, 3, 3, 603.

- Shrestha, B. ve Hao, H., 2018. Building Pounding Damages Observed duringt 2015 Gorkha Earthquake, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32, 2, 04018006.
- Soltysik, B., Falborski, T. ve Jankowski, R., 2017. Preventing of Earthquake-Induced Pounding between Steel Structures by Using Polymer Elements – Experimental Study, X International Conference on Structural Dynamics, Rome, Italy.
- Standard-2800, 2007. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, BHRC Publication, No. S-465, 94 s.
- Stavridis, A., Koutromanos, I. ve Shing, P., B., 2012. Shake-Table Tests of a Three-Story Reinforced Concrete Frame with Masonry Infill Walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41, 6, 1089-1108.
- Stone, W., C., Yokel, F., Y., Celebi, M., Hanks, T. ve Leyendecker, E., V., 1987. Engineering Aspects of the September 19, 1985 Mexico Earthquake, NBS Building Science Series, 165, 207.
- Sunca, F., Ergün, M., Altunışık, A., C., Günaydın, M. ve Okur, F., Y., 2021a. Modal Identification and Fatigue Behavior of Eynel Steel Arch Highway Bridge with Calibrated Models, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11, 5, 1337-1354.
- Sunca, F., Okur, F., Y., Altunışık, A., C.ve Kahya, V., 2021b. Optimal Sensor Placement for Laminated Composite and Steel Cantilever Beams by the Effective Independence Method, Structural Engineering International, 31, 1, 85-92.
- Takabatake, H., Yasui, M., Nakagawa, Y. ve Kishida, A., 2014. Relaxation Method for Pounding Action between Adjacent Buildings at Expansion Joint, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 43, 9, 1381-1400.
- Taleshian, H., A., Roshan, A., M. ve Amiri, J., V., 2022. Seismic Pounding Mitigation of Asymmetric-Plan Buildings by using Viscoelastic Links, Structures, 36, 189-214.
- TBC., 1997. Taiwan Building Code, Construction and Planning Administration Ministry of Interior, Taipei.
- TBDY., 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 416 s.
- 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, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

- Türkay, A., 2019. Betonarme Perdelerde Burulma Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- T.S.E., 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 83 s.
- T.S.E., 2010. Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, TS EN 12390-6, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13 s.
- T.S.E., 2019. Beton - Taze Beton Deneyleri – Bölüm 1: Numune Alma ve Yaygın Kullanılan Aygıtlar, TS EN 12350-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 11 s.
- T.S.E., 2019. Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması, TS EN 12390-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 7 s.
- T.S.E., 2019. Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayin, TS EN 12390-3, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 23 s.
- T.S.E., 2021. Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, TS EN 12390-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 7 s.
- URL-1, www.tinyvital.com/images/mexcite1985/index.html. 19 Aralık 2022.
- URL-2, fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmpoe/esdep/master/wg17/l0100.htm. 19 Aralık 2022.
- URL-3, www.bksv.com/de/transducers/vibration/impact-hammers/8210. 03 Ocak 2023.
- URL-4, www.https://www.apsdynamics.com/en/index.html. 03 Ocak 2023.
- URL-5, www.johnmartin.com/earthquakes/eqshow/647003_09.htm. 19 Aralık 2022.
- Wang, S. S. ve Hong, H., P., 2006. Quantiles of Critical Separation Distance for Nonstationary Seismic Excitations, Engineering Structures, 28, 7, 985-991.
- Wang, Z., Yang, D., H., Yi, T., H., Zhang, G., H. ve Han, J., G., 2022. Eliminating Environmental and Operational Effects on Structural Modal Frequency: A Comprehensive Review, Structural Control and Health Monitoring, 29, 11, e3073.
- Wieser, J., Pekcan, G., Zaghi, A., E., Itani, A. ve Maragakis, M., 2013. Floor Accelerations in Yielding Special Moment Resisting Frame Structures, Earthquake Spectra, 29, 3, 987-1002.

- Womack, K., C. ve Halling, M., W., 1999. Forced Vibration Testing of the I-15 South Temple Bridge, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: UT-99.15, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Xia, Y., Chen, B., Weng, S., Ni, Y., Q. ve Xu, Y., L., 2012. Temperature Effect on Vibration Properties of Civil Structures: A Literature Review and Case Studies, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2, 1, 29-46.
- Yaghmaei-Sabegh, S. ve Jalali-Milani, N., 2012. Pounding Force Response Spectrum for Near-Field and Far-Field Earthquakes, Scientia Iranica, 19, 5, 1236-1250.
- Zembaty, Z., Kowalski, M. ve Pospisil, S., 2006. Dynamic Identification of a Reinforced Concrete Frame in Progressive States of Damage, Engineering Structures, 28, 5, 668-681.
- Zhang, H., Kuang, J., S. ve Yuen, T., Y., 2017. Low-Seismic Damage Strategies for Infilled RC Frames: Shake-Table Tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46, 14, 2419-2438.
- Zhao, J. ve DeWolf, J., T., 2002. Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge, Journal of Bridge Engineering, 7, 6, 350-356.
- Zhao, Y., Yu, C., Zhang, W., Xie, Z., Yu, S. ve Du, X., 2022. Shake Table Tests of a Corrugated Steel Sheathed Cold-Formed Steel Structure, Journal of Building Engineering, 60, 105161.

ÖZGEÇMİŞ

Fezayil SUNCA, ilk ve orta öğrenimini (1998-2005) Servet Akaydın İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini (2005-2009) Mustafa Eraslan Lisesi'nde, lisans eğitimini (2009-2013) Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde ve yüksek lisans eğitimini (2013-2016) Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. Lisans eğitiminde, fakülte üçüncüsü ve bölüm ikincisi derecelerini elde etti. 2014 yılının başlarında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. 2015 ve 2017 yıllarında danışmanlığını yürüttüğü takımlarla birlikte DASK tarafından düzenlenen depreme dayanıklı yapı tasarımı konseptli ulusal yarışmalarda “En İyi İletişim Becerisi” ve “En İyi Deprem Performansı” özel ödülleri aldı. Halen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yapan Fezayil SUNCA, evli ve bir çocuk babasıdır. Çeşitli akademik çalışmalarda görev yapan SUNCA'ya ait SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanmış makaleler aşağıda sıralanmıştır:

- Altunışık, A., C., Sunca, F. ve Sevim, B., 2023. Modal Parameter Identification and Seismic Assessment of Historical Timber Structures under Near-Fault and Far-Fault Ground Motions, Structures, 47, 1624-1651.
- Kaya, A., Adanur, S., Bello, R., A., Genç, A., F., Okur, F., Y., Sunca, F., Günaydın, M., Altunışık, A., C. ve Sevim, B., 2023. Post-Earthquake Damage Assessments of Unreinforced Masonry (URM) Buildings by Shake Table Test and Numerical Visualization, Engineering Failure Analysis, 143, 106858.
- Sesli, H., Hüsem, M., Sunca, F., Altunışık, A., C. ve Okur, F., Y., 2023. Experimental Investigation on New Mechanical Systems Effectiveness to Reduce the Coupling Beam Damages, Bulletin of Earthquake Engineering, 21, 535-582.
- Altunışık, A., C., Önalın, F. ve Sunca, F., 2022. A Parametric Study on Damage Assessment of RC Buildings Subjected to Blast Loading, Arabian Journal for Science and Engineering, 1-23.
- Günaydın, M., Sunca, F., Altunışık, A., C., Ergün, M. ve Okur, F., Y., 2022. Nondestructive Experimental Measurement, Model Updating, and Fatigue Life Assessment of Çarşamba Suspension Bridge, Journal of Bridge Engineering, 27, 2, 05021017.

- Altunışık, A., C., Önalın, F. ve Sunca, F., 2021. Effects of Concrete Strength and Openings in Infill Walls on Blasting Responses of RC Buildings subjected to TNT Explosive, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45, 4, 2525-2554.
- Altunışık, A., C., Sunca, F., Genç, A., F. ve Tavşan, C., 2021. Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses, International Journal of Architectural Heritage, 1-36.
- Sunca, F., Ergün, M., Altunışık, A., C., Günaydın, M. ve Okur, F., Y., 2021. Modal Identification and Fatigue Behavior of Eynel Steel Arch Highway Bridge with Calibrated Models, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11, 5, 1337-1354.
- Altunışık, A., C., Sevim, B., Sunca, F. ve Okur, F., Y., 2021. Optimal Sensor Placements for System Identification of Concrete Arch Dams, Advances in Concrete Construction, 11, 5, 397-407.
- Sunca, F., Okur, F., Y., Altunışık, A., C. ve Kahya, V., 2021. Optimal Sensor Placement for Laminated Composite and Steel Cantilever Beams by the Effective Independence Method, Structural Engineering International, 31, 1, 85-92.
- Akköse, M., Sunca, F. ve Türkay, A., 2018. Pushover Analysis of Prefabricated Structures with Various Partially Fixity Rates, Earthquake and Structure, 14, 1, 21-32.