

**DALGA YAYILIMININ YÜKSEK BİNALARIN SİSMİK  
DAVRANIŞINA OLAN ETKİLERİNİN SAYISAL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Fikret MEHDİ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGA YAYILIMININ YÜKSEK BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA  
OLAN ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Fikret MEHDİ**  
0000-0002-9373-9589

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021  
Her Hakkı Saklıdır

**TEZ ONAYI**

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../2021

**Fikret MEHDİ**

## ÖZET

Doktora Tezi

### DALGA YAYILIMININ YÜKSEK BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞINA OLAN ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Fikret MEHDİ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

**İkinci Danışman:** Prof. Dr. Yasin FAHJAN (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Bu tez, yüksek binalarda dalga yayılma olgusunun temel fiziğinin sayısal yorumlanması üzerinedir. Tezin başlıca amacı, dalga yayılımının yüksek binaların sismik dinamik tepkisi üzerindeki etkilerini sayısal modeller geliştirerek irdelemektir. Çalışmayı gerçekleştirebilmek için iki ana unsur vardır: Birincisi dalganın seçimi ve ölçeklendirilmesi, ikincisi ise dalganın yayılacağı yapının modellenmesidir. Tez kapsamında esas olarak dikkate alınan dalga sismik bir dalgadır. Deprem yer hareketinin ölçeklendirilmesinde, depremin yatay bileşeni düşey bileşenine göre daha kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Bu nedenle tezde, sismik yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirilmesine yoğunlaşmış ve bunun için bir denklem önerilmiştir. Önerilen denklem, doğrusal olmayan bir regresyon analizinin sonucunda elde edilmiştir. Dalganın yayılacağı yapılar için idealleştirilmiş ve uygulamadaki taşıyıcı sistemleri temsil eden yüksek bina modelleri seçilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada, 300 m yüksekliğinde temsili sürekli bir mega kolondan ve ayırık perde duvardan oluştuğu kabul edilen iki yüksek yapı dikkate alınmıştır. Bu yapıların tabanına; enine ve boyuna doğrultularda dalga benzeri bir yarım sinüs darbesi şeklindeki dalga uygulanmıştır. Bu yapı modelleri üzerinde dalga yayılımını fiziki olarak görselleştirmek için, uygulamada doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapabilen yazılımların etkinliği araştırılmıştır. Daha sonra, çekirdek perde duvar ve çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 46 katlı yüksek bina dikkate alınmıştır. Bu binanın tabanına enine ve boyuna doğrultularda sismik dalgalar uygulanmıştır. Binanın tabanından tepisine kadar dalgaların yayılımı, çekirdek perde duvar üzerinde ve çerçeve sistem üzerinde ayrı ayrı irdelenmektedir. Dikkate alınan yüksek bina taşıyıcı elemanlarındaki kesit etkileri (eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti) ve görelî kat ötelenmesi dalga yayılımının dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan çalışmaları başlıca üç ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar: (1) Sismik yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirilmesi, (2) Yüksek yapılarda dalga yayılmasının sayısal olarak modellenerek irdelenmesi. (3) Yüksek binaların açık ve kapalı dinamik tepki analizleri için Rayleigh Sönümündeki kütle ve rijitlik kısımlarının etkinlikleri ve bunların dikkate alınma şekillerinin irdelenmesidir. Diğer taraftan, çalışmada söz konusu dinamik analizleri gerçekleştirmede karşılaşılabilecek sorunlar da irdelenmektedir. Dinamik davranışta yüksek modların etkisi ve sönüm etkisi gibi hususlar da irdelenmektedir. Ayrıca analizler dalga yayılımını dikkate alarak ve ihmal ederek gerçekleştirildiğinden elde edilen bulgulardan dalga yayılımı açısından aradaki farklar karşılaştırılmalı olarak irdelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dalga yayılımı, deprem düşey bileşeni, ölçeklendirme faktörü, yüksek yapılar, sayısal modelleme, açık ve kapalı çözüm, Rayleigh sönümü.

**2021, XI + 125 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### NUMERICAL INTERPRETATION OF THE EFFECT OF WAVE PROPAGATION PROCEDURE ON THE SEISMIC RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDINGS

**Fikret MEHDİ**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

**Second Supervisor:** Prof. Dr. Yasin FAHJAN (İstanbul Technical University)

A numerical interpretation of the basic physics of wave propagation through tall structures is presented. The main purpose of the thesis is to numerically investigate the impact of seismic wave propagation on the dynamic response of high rise buildings. The specified goal is achieved by two key steps as follows: (1) the selection and scaling of the wave, and (2) the selection of the high rise structural model. The selection and scaling of the horizontal seismic component has been addressed in detail, meanwhile the selection and scaling of vertical seismic ground motion has been less of a concern. Therefore, as part of the conducted work herein, the scaling factor of vertical ground motion has been evaluated for different ground motion parameters and using a nonlinear regression analysis, a power equation is proposed to scale the vertical seismic ground motion. To visualize the essential physics of wave propagation phenomenon, two idealized models as a continuous mega column and a discrete core wall of 300m height each are proposed. A half sine pulse like wave is applied as a transverse wave as well as a compression wave which is supposed to propagate along the height of the considered models. The reliability of the nonlinear design and analysis packages to accurately detect the physics of wave propagation phenomenon is approved. Thereafter, the impact of earthquake wave propagation on the dynamic response of a 46 story high-rise building with a core shear wall and a frame system is investigated in transverse as well as the longitudinal directions. The axial force, shear force, bending moment, and the inter-story drift are evaluated considering wave propagation and ignoring it. It is possible to categorize the studies in three main groups as (1) Scaling of the vertical component of seismic ground motion, (2) Numerical interpretation of wave propagation in high-rise structures. (3) Investigate the efficiency of Rayleigh damping model for the higher mode shapes considering the wave propagation procedure for high rise buildings. The pure impact of considering wave propagation procedure on the dynamic response of high rise buildings has been addressed as well. The more important is to scrutinize the modeling process and the consideration of wave propagation phenomenon; and to investigate the challenges that may be encountered within this type of analysis procedure.

**Key words:** Wave propagation, high rise buildings, numerical modeling, explicit analysis, Rayleigh damping, vertical ground motion, scaling factor, response spectrum, ASCE7-16, Eurocode 8.

**2021, XI+125 pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Her şeyden önce ve en başta övgü, muhtaç olduğumuz her şeye gücü yeten Yüce Allah'adır. Araştırmamı yapmam için bana fırsat, kararlılık ve güç verdiği için Yüce Allah'a şükrederim.

Öncelikle danışmanlarım Prof. Dr. Adem Doğangün ve Prof. Dr. Yasin Fahjan'a sabır, motivasyon ve engin bilgileri ile doktora çalışmama ve ilgili araştırmalarımın sürekli destekleri için içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Bu tezin tüm araştırma ve yazım süreçlerinde bana yardımcı olan danışmanlığınız için çok teşekkür ederim. Beni sınırlarımın ötesine zorladığınız ve inanılmaz fedakârlıklarınız için ayrıca teşekkür ederim. Sizin danışmanlığınız ve sürekli yardımınız olmasaydı bu çalışma mümkün olamazdı. Beni kendime inandıran ve akademik yazma becerilerimi geliştirmem için destekleyen Dr. Mohamed M. Mabrok'a derin minnettarlığımı iletirim. Tez komitem Prof. Dr. Naci Çağlar ve Doç. Dr. Hakan T. Türker'e çalışmalarımın ilgili bilgilendirici yorumları, sayısız görüşleri, teşvikleri ve önerileri için teşekkür ederim. Gebze Teknik Üniversitesinden Dr. Fatma İlknur Kara'ya desteği için içten teşekkür etmek istiyorum. Bursa Uludağ Üniversitesi'ne uyum sağlamama yardımcı olan meslektaşım Mehmet Ömer'e de şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca tablo ve şekil başlıklarının Türkçe çevirisini kontrol ettiği için meslektaşım Nurten Topaloğlu'na minnetle teşekkür etmek istiyorum. İhtiyaç duyduğum desteği sağladıkları için İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm meslektaşlarıma ve personele de müteşekkirim. Bana yeni ortamıma uyum sağlamama yardım ettiğiniz için teşekkür ederim. Teşekkürler Berna, Tuğçe, Şerife, Burcu, Büşra, Recep Emre, Cavit ve Mehmet. ACE Arab Consulting Engineers'daki Mısırlı aileme derin minnettarlığı sunarım. Her zaman yanımda olduğunuz, inişler ve çıkışlar yaşadığımda benimle birlikte yürüdüğünüz için teşekkür ederim. Teşekkürler Samar, Manal, Mona, Huda, Hazem, Abdallah, Akram, Mohamed Nabih, Mohamed Sami, Abdelwahab ve Ahmed Husni. Ayrıca, paha biçilmez IT desteği için Eng. Mohamed Obada Al Safwa'ya teşekkür ederim.

Son olarak; bu doktora çalışmam, gelmiş geçmiş en harika aileye, kızlarıma, anne ve babama, kardeşlerime ithaf edilmiştir. Bugün sizlerin, sonsuz koşulsuz sevginiz, desteğiniz, yardımlarınız ve benim için eksilmeyen dualarınız sayesinde burada olduğuma inanıyorum. Samimi destekleri ve cesaretlendirmeleri için Dr. Magdy Said, Maha Dalati, Nadia Aldakrory ve Bothina Osama'ya da içten teşekkürlerimi sunarım.

Fikret MEHDİ  
...../...../2021

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT .....	v
i .....	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Dinamik Yapısal Tepkiyi Analiz Etmek İçin Dalga Yayılma Yaklaşımı....	4
2.2. Rayleigh Sönümü.....	19
2.3. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşeninin Ölçeklendirilmesi .....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşeninin Ölçeklendirilmesi .....	24
3.1.1. Hedef Tepki Spektrumu.....	27
3.1.2. Üç boyutlu dinamik analizde gerçek yer hareketinin spektral ölçeklendirilmesi için periyot aralığı .....	29
3.2. Yüksek Yapılarda Dalga Yayılmasının Sayısal Olarak İncelenmesi.....	31
3.3. Yüksek Binaların Açık Dinamik Tepki Analizi için Rayleigh Sönümlemesinin Sayısal Tartışması .....	36
3.3.1. Kullanılan model.....	37
3.3.2. Rayleigh sönümü .....	44
3.4. Yüksek Binaların Dinamik Tepki Analizi için Dalga Yayılımı Yaklaşımı-Sayısal Tartışma .....	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	47
4.1. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşeninin Ölçeklendirilmesi .....	47
4.1.1. Deprem büyüklüğü ve VSF /HSF oranı.....	47
4.1.2. Joyner-Boore mesafesi ve VSF/ HSF oranı.....	47
4.1.3. Farklı zemin sınıfları için VSF/ HSF oranı.....	48
4.1.4. Yoğunluk ölçümü endeksleri .....	51
4.1.5. VSF/ HSF oranı için (V/H)PGA oranına karşı regresyon analizi.....	54
4.2. Yüksek Yapılarda Dalga Yayılmasının Sayısal İrdelenmesi .....	68
4.2.1. Kayma dalgası.....	69
4.2.2. Boyuna Basınç Dalgası .....	70
4.2.3. Karışık zaman entegrasyon yöntemleri.....	79
4.2.4. Yüksek frekans ve açık çözüm tekniği .....	79
4.3. Yüksek Binaların Açık Çözüm Tekniği ile Tepki Analizi için Rayleigh Sönümünün İrdelenmesi .....	80
4.4. Yüksek Binaların Dinamik Tepki Analizi için Dalga Yayılımı Yaklaşımının Sayısal Olarak İrdelenmesi .....	93
5. SONUÇLAR.....	108
KAYNAKLAR .....	112
ÖZGEÇMİŞ .....	121





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	Malzemenin elastisite modülü
G	Kayma modülü
$\rho$	Kütle yoğunluğu
$\alpha$	Rayleigh sönümü kütle katsayı
$\beta$	Rayleigh sönümü rijitlik katsayı
[C]	Sönüm matrisi
[m]	Kütle matrisi
M	Eğilme momenti
M <sub>w</sub>	Deprem büyüklüğü
N	Eksenel kuvveti
V	Kesme kuvveti
S <sub>a</sub> <sup>target</sup>	Hedef ivme tepki spektrumu
S <sub>a</sub> <sup>real</sup>	Gerçek ivme tepki spektrumu
S <sub>D1</sub>	1 saniye periyot tasarım spektral tepki ivmesi
S <sub>DS</sub>	Kısa periyot tasarım spektral tepki ivmesi
S <sub>F</sub>	Ölçeklendirme faktörü
SSE	Hata nedeniyle kareler toplamı
T	Titreşim periyodu
T <sub>1</sub>	Yatay ilk modun en büyük periyodu
T <sub>1S</sub>	Sismik tepkinin yatay ilk modunun en küçük titreşim periyodu
T <sub>l</sub>	Minimum ölçeklendirme periyodu
T <sub>m</sub>	Maksimum ölçeklendirme periyodu
V <sub>P</sub>	Boyuna dalğanın hızı
V <sub>S</sub>	Kayma dalgasının hızı
V <sub>SF</sub>	Yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirme faktörü

## Kısaltmalar Açıklama

CWP	Dinamik tepkiler dalga yayılma dikkate alınarak
D	Gerçek ve hedef ivme tepki spektrumları arasındaki farkı
EXP	Açık çözüm tekniği
FAS	Fourier Genlik Spektrumları
GMPEs	Ampirik yer hareketi tahmin denklemleri
GMRotD50	Oryantasyondan bağımsız geometrik döndürülmüş
H <sub>SF</sub>	Yer hareketinin yatay bileşeninin ölçeklendirme faktörü
ID	Katlar arası kayma
IMP	Kapalı çözüm tekniği
IWP	Dinamik tepkiler dalga yayılması ihmal edilerek
R <sub>JB</sub>	Joyner-Boore mesafeleri
R-kare	Çoklu korelasyon katsayısının karesi
RMSE	Kök ortalama kare hatası

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Ana GMPE ampirik yer hareketi tahmin denklemlerini kullanarak, deprem büyüklüğüne ve deprem bölgesinden kaynağa mesafeye göre farklı zemin sınıfları için $S_{D1}/S_{DS}$ değerleri. ....	28
Şekil 3.2. Bu çalışmada kullanılan %5 sönüm oranına sahip hedef tepki spektrumları. (a) $S_{D1}/S_{DS}$ oranının farklı değerleri için ASCE 7-16 yatay tasarım tepki spektrumları. (b) Uyumlu ASCE 7-16 düşey tasarım tepki spektrumları. (c) $a_g = 0.4$ için EC 8 Tip elastik düşey tepki spektrumu.....	29
Şekil 3.3. Sayısal sürekli model, 3B görünüm ve ilk üç mod şekli.....	32
Şekil 3.4. Sayısal ayırık model, 3 boyutlu görünüm ve ilk üç mod şekli.....	33
Şekil 3.5. Dalga şeklinde uygulanan yarı sinüzoidal atım ve ayırık sayısal modelin kesiti..	33
Şekil 3.6. 46 katlı yüksek binanın tipik plan görünümü. ....	39
Şekil 3.7. 28.06.1992 tarihli Landers depremi için Yermo İtfaiye İstasyonu'ndan alınan yatay ve düşey sismik dalgaların uyarımı. ....	40
Şekil 3.8. Çekirdek perde duvar, 3B görünüm ve ilk 9 mod şekli.....	41
Şekil 3.9. Çerçeve sistem, 2 boyutlu görünüm ve ilk 5 mod şekli.....	42
Şekil 3.10. Rayleigh sönümü (a) dalga yayılımı ihmal edilerek ve (b) dalga yayılımı dikkate alarak. ....	45
Şekil 4.1. $V_{SF}/H_{SF}$ oranı için $M_w$ . (a) $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ ile ASCE7-16 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme. (b) EC8 tepki spektrumlarına göre ölçeklendirme. ....	47
Şekil 4.2. $V_{SF}/H_{SF}$ oranı için $R_{JB}$ (km). (a) ASCE7-16 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için. (b) EC8 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme.....	48
Şekil 4.3. A & B zemin sınıflarına göre $V_{SF}/H_{SF}$ oranının frekansı. A1 & B1, $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi A2 & B2, $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$ & $0.35$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. A3 & B3, $S_{D1}/S_{DS} = 0.2$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. A4 & B4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi..	49
Şekil 4.4. C zemin sınıfına göre $V_{SF}/H_{SF}$ oranının frekansı. C1, $S_{D1}/S_{DS} = 0.6$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C2, $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C3, $S_{D1}/S_{DS} = 0.25$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. ....	50
Şekil 4.5. D zemin sınıfına göre $V_{SF}/H_{SF}$ oranının frekansı. D1, $S_{D1}/S_{DS} = 0.7$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. D2, $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. D3, $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. D4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. ....	50
Şekil 4.6. A & B zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ 'ye oranı. (a) $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi, (b) $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$ & $0.35$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (c) $S_{D1}/S_{DS} = 0.2$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. ....	52
Şekil 4.7. Zemin sınıfları C için $V_{SF}/H_{SF}$ oranına karşı $(V/H)_{PGA}$ oranı. (a) $S_{D1}/S_{DS} = 0.6$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (b) $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (c) $S_{D1}/S_{DS} = 0.25$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.....	53
Şekil 4.8. Zemin sınıfları D için $V_{SF}/H_{SF}$ oranına karşı $(V/H)_{PGA}$ oranı. (a) $S_{D1}/S_{DS} = 0.7$ için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (b) $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$ için ASCE7-16 tepki	

spektrumunu ölçeklendirmesi. (c) $S_{D1}/ S_{DS} = 0.4$ için ASCE7-16 tepki spektrumunu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumunu ölçeklendirmesi. ....	53
Şekil 4.9. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A1& B1 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	53
Şekil 4.10. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A2& B2 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	55
Şekil 4.11. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A3& B3 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	56
Şekil 4.12. EC8'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A4& B4 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	56
Şekil 4.13. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C1 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	57
Şekil 4.14. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C2 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	57
Şekil 4.15. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C3 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	58
Şekil 4.16. EC8'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C4 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	58
Şekil 4.17. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D1 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	59
Şekil 4.18. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D2 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	59
Şekil 4.19. ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D3 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	60
Şekil 4.20. EC8'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D4 zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının $(V/H)_{PGA}$ oranına göre uygun eğri oluşturulması. ....	60
Şekil 4.21. Veri ortalama değerleri frekansı ve tahmini ortalama değerler frekansı. ....	68
Şekil 4.22. Veri standart sapma frekansı ve tahmini standart sapma frekansı. ....	68
Şekil 4.23. Sürekli sayısal model üzerinden 3, 15, 30, 45,60, 75, 150, 225 ve 300m seviyelerinde iletilen ve yansıyan yatay deformasyonun dalgaları sistemi. ....	71
Şekil 4.24. Ayrık sayısal model üzerinden 3, 15, 30, 45,60, 75, 150, 225 ve 300m seviyelerinde iletilen ve yansıtılan yatay deformasyon dalgaları sistemi. ....	72
Şekil 4.25. Sürekli model için 3, 24 ve 27m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi. ....	72
Şekil 4.26. Ayrık model için 3, 18 ve 21m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi. ....	73
Şekil 4.27. Sürekli model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi. Yukarı doğru hareket eden dalgaların pozitif polarizasyonu sürekli çizgiler ile gösterilmektedir. Aşağı doğru hareket eden dalgaların negatif polarizasyonu kesikli çizgiler ile gösterilmektedir. ....	73
Şekil 4.28. Ayrık model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi. Yukarı doğru hareket eden dalgaların pozitif polarizasyonu sürekli çizgiler ile gösterilmektedir. Aşağı doğru hareket eden dalgaların negatif polarizasyonu kesikli çizgiler ile gösterilmektedir. ....	74
Şekil 4.29. Sürekli sayısal model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde kayma hızının zamanla değişimi. ....	74
Şekil 4.30. Ayrık sayısal model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde kayma hızının zamanla değişimi. ....	75

Şekil 4.31. Sürekli sayısal model için boyuna basınç uyarımı nedeniyle 3, 15, 30, 45, 60, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	75
Şekil 4.32. Ayrık sayısal model için boyuna basınç uyarımı nedeniyle 3, 15, 30, 45, 60, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	76
Şekil 4.33. Sürekli sayısal model için boyuna uyarıma bağlı olarak 3, 39 ve 42 yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	76
Şekil 4.34. Ayrık sayısal model için boyuna uyarıma bağlı olarak 3, 27 ve 30 yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	76
Şekil 4.35. Sürekli model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	77
Şekil 4.36. Ayrık model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde dikey deformasyonun zamanla değişimi. ....	77
Şekil 4.37. Sürekli model için 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde boyuna hızın zamanla değişimi. ....	78
Şekil 4.38. Ayrık model için 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde boyuna hızın zamanla değişimi. ....	78
Şekil 4.39. Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi. ....	83
Şekil 4.40. Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi. ....	84
Şekil 4.41. Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP kesme kuvvetinin zamanla değişimi. ....	85
Şekil 4.42. Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP kesme kuvvetinin zamanla değişimi. ....	86
Şekil 4.43. Perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eğilme momentinin zamanla değişimi. ....	87
Şekil 4.44. Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eğilme momentinin zamanla değişimi. ....	88
Şekil 4.45. Perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi. ....	89
Şekil 4.46. Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. Katlarda EXP ve IMP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi. ....	90
Şekil 4.47. Perde duvar: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvveti, kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları. ....	91
Şekil 4.48. Çerçeve sistem: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvveti, kayma kuvveti ve Eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları. ....	92
Şekil 4.49. Perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda CWP ve IWP kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları. ....	96
Şekil 4.50. Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda CWP ve IWP kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları. ....	97
Şekil 4.51. Perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvveti ve görelî kat ötelenmesi için Fourier genlik spektrumları. ....	98
Şekil 4.52. Çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvveti ve görelî kat ötelenmesi için Fourier genlik spektrumları. ....	99
Şekil 4.53. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. Katlarda CWP ve IWP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi. ....	100
Şekil 4.54. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi. ....	101

Şekil 4.55. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki perde duvar: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eğilme momentinin zamanla değişimi.....	102
Şekil 4.56. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eğilme momentinin zamanla değişimi. ....	103
Şekil 4.57. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP kesme kuvvetinin zamanla değişimi.....	104
Şekil 4.58. Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP kesme kuvvetinin zamanla değişimi. ....	105
Şekil 4.59. Loma Prieta uzunlamasına deprem kayıtları etkisindeki perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi. ....	106
Şekil 4.60. Loma Prieta Longitudinal deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi. ....	107

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. NEHRP2003 koşullarına göre $V_{S30}$ dikkate alınarak, farklı zemin sınıfları için $S_{D1}/S_{DS}$ oranları. ....	27
Çizelge 3.2. Periyot aralıklarının sınırları. ....	30
Çizelge 3.3. Çerçeve sistem için kat yükseklikleri ve malzeme özellikleri. ....	41
Çizelge 3.4. Perde duvar ve çerçeve sistem için 20 mod şeklinin frekansı ve titreşim periyodu. ....	43
Çizelge 3.5. Dinamik analizde kullanılan yer hareketleri. ....	46
Çizelge 4.1. ASCE7-16 ye göre, A&B zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı ile $(V/H)_{PGA}$ oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri. ....	62
Çizelge 4.2. ASCE7-16 ye göre, C zemin sınıfı için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı ile $(V/H)_{PGA}$ oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri. ....	62
Çizelge 4.3. ASCE7-16 ye göre, D zemin sınıfı için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı ile $(V/H)_{PGA}$ oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri. ....	63
Çizelge 4.4. EC8 ye göre, A & B, C ve D zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı ile $(V/H)_{PGA}$ oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri. ....	63
Çizelge 4.5. ASCE7-16 ye göre, A&B zemin sınıfları için veriler ve tahmin edilen değerler için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının minimum, maksimum ve ortalama değerleri ile Standart sapması. ....	64
Çizelge 4.6. ASCE7-16 ye göre, C zemin sınıfı için veriler ve tahmin edilen değerler için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının minimum, maksimum ve ortalama değerleri ile standart sapması. ....	65
Çizelge 4.7. ASCE7-16 ye göre, D zemin sınıfı için veriler ve tahmin edilen değerler için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının minimum, maksimum ve ortalama değerleri ile standart sapması. ....	66
Çizelge 4.8. EC8 koduna göre A & B, C ve D zemin sınıfları için tahmin edilen değerler ve veriler için $V_{SF}/H_{SF}$ oranının minimum, maksimum ve ortalama değerleri ile standart sapması. ....	67
Çizelge 4.9. Perde duvar ve çerçeve sistem için açık ve kapalı yöntemleri dikkate alarak dinamik tepkilerin maksimum mutlak değerlerine oranı. ....	82
Çizelge 4.10. Landers enine ve boyuna dalgalar için , perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı. ....	94
Çizelge 4.11. Northridge enine ve boyuna dalgalar için perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı. ....	94
Çizelge 4.12. Loma Prieta enine ve uzunlamasına dalgalar için perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı. ....	95
Çizelge 4.13. Üç set enine ve boyuna sismik dalga altında perde duvar ve çerçeve sistem için ortalama yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı. ....	95

## 1. GİRİŞ

Deprem yer hareketine maruz kalan yapıların dinamik analizinde, dalga yayılımının genel olarak ihmal edildiği belirtilebilir. Dalga yayılımının irdelendiği az sayıda da olsa çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan başlıcalarında, deprem yükleri etkisine maruz kalan binalardan alınan ölçüm değerleri ile matematiksel/analitik modellerden elde edilen sonuçlar irdelenmektedir. Modellerden elde edilen değerlerle yapıda gerçekleştirilen ölçüm değerlerinden elde edilen değerler iyi bir uyum sağlasa da, dalga yayılımının, pratik mühendislik anlamında sayısal modeller aracılığıyla görselleştirilmesine ve karşılaştırmalı olarak irdelenmesine rastlanmamıştır.

Dalga yayılım analizini gerçekleştirebilmek için iki ana unsur vardır, birincisi dalganın seçimi ve ölçeklendirilmesini içeren dalganın dikkate alınması, ikincisi ise dalganın yayılacağı yapının modellenerek dikkate alınmasıdır. Bu tez kapsamında esas olarak dikkate alınan dalga sismik bir dalgadır. Dalganın yayılacağı yapı olarak ise yüksek bina seçilmiştir. Son on yılda yüksek binalar dünyanın değişik bölgelerinde artan oranda inşa edilmektedir. Dalga yayılımının az ya da orta yükseklikteki binalara oranla yüksek yapılarda daha fazla etkili olabileceği düşünülebilir.

Dalga yayılmasının temel özellikleri:

- (1) tepki süresi gecikmesi,
- (2) iletilen dalgalarda çoğaltma,
- (3) dalgaların negatif polarizasyon ile yansması,
- (4) pozitif polarizasyon ile dalgaların iletimi,
- (5) ilerleyen dalgaların tepe noktalarının kayması.
- (6) modellerin serbest mesnet ucunda iletilen ve yansıyan dalgaların büyüklüğü.

Deprem yer hareketinin ölçeklendirilmesi göz önüne alındığında, depremin yatay bileşeni düşey bileşenine göre daha kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Bu nedenle tezde, sismik yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirilmesine yoğunlaşmış ve bunun için bir denklem önerilmiştir. Önerilen denklem, doğrusal olmayan bir regresyon analizinin sonucunda elde edilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, yüksek binalarda dalga yayılımını fiziki olarak görselleştirmek ve doğrusal olmayan analiz yapabilen yazılımların etkinliğini ortaya koymak amacıyla 300 m yüksekliğinde temsili sürekli bir mega kolon ve çekirdek perde duvardan oluştuğu kabul edilen iki yüksek yapı dikkate alınmıştır. Bu yapılara; enine ve boyuna doğrultularda dalga benzeri bir yarım sinüs darbesi uygulanmıştır.

Daha sonra, çekirdek perde duvar ve çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 46 katlı binada enine ve boyuna doğrultularda sismik dalgaların yayılması incelenmiştir. Burada sadece dalga yayılmasına odaklanıldığından, dikkate alınan binanın yönetmeliklerde öngörülen koşulları sağlaması bakımından irdelenmediğini belirtmek uygun olmaktadır. Dalga yayılımı, bu yüksek binanın çekirdek perde duvarında ve bir çerçeve aksında ayrı ayrı irdelenmektedir. Dikkate alınan yüksek bina elemanlarındaki kesit etkileri (eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti) ve görelî kat ötelenmesi dalga yayılımının hem dikkate alındığı hem de ihmal edildiği durumlar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Çalışmada sözkonusu dinamik analizleri gerçekleştirmede karşılaşılabilecek sorunlar da irdelenmektedir. Dinamik davranışta yüksek modların etkisi ve sönüm etkisi gibi hususlar da irdelenmektedir. Ayrıca analizlerde kapalı ve açık çözüm tekniklerinin her ikisi de kullanılmakta ve elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak irdelenmektedir.

### ***Amaç ve Kapsam***

Bu tezin başlıca amacı, yüksek binaların sismik dinamik tepkisi üzerindeki dalga yayılımının etkilerini sayısal modeller geliştirerek irdelemektir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmada;

- Binalarda dalga yayılımının dikkate alınması hususunda teorik ve pratik uygulamalar arasında bir köprü oluşturmak,
- Yüksek binaların yüksekliği boyunca dalga yayılımının fiziki olarak sayısal görselleştirilmesini yapmak,
- Düşey sismik bileşeni gerçekçi olarak ölçeklendirebilmek için bir bağıntı önermek,
- Binanın dinamik tepkileri (iç kuvvetler ve ötelenmeler) üzerinde dalga yayılımının etkilerini incelemek,



- Analiz ve tasarım yapanlara dalga yayılımını dikkate alabilmeleri için dalga seçimi ve bina model parametreleri konularında faydalı bilgiler sunmak, hedeflenmiştir.

Yukarıda belirtilen amaç ve hedefler doğrultusunda gerçekleştirilen çalışma 5 bölüm halinde sunulmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup, bu bölümde genel bilgiler ile tezin amaç ve kapsamı sunulmaktadır. İkinci bölümde konu hakkında ya da yakın konularda şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaların literatür irdelenmesi sunulmaktadır. Üçüncü bölümde kullanılan metotlar tanıtılmakta ve çalışmaya konu olan sayısal modeller oluşturulmaktadır. Dördüncü bölümde gerçekleştirilen çalışmanın tümünden elde edilen bulgular irdelenmektedir. Beşinci bölüm sonuç ve öneriler bölümü olup bu bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Dinamik Yapısal Tepkiyi Analiz Etmek İçin Dalga Yayılma Yaklaşımı

Yapıların dinamik tepkisi üzerinde dalga yayılımını inceleyen konuyla ilgili olan çalışmalar konusunda yapılan literatür çalışmasına göre aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır:

Yazarın bilgisine göre, dalga yayılmasının yüksek yapılar üzerindeki etkisi, ilk olarak Westergaard tarafından incelenmiştir. 1933 yılında yayınlanmış çalışmada bir kayma dalgası tepe noktasının idealize edilmiş bina yüksekliği boyunca yayılması analiz edilmiştir. Basitleştirilmiş bir analitik yöntem kullanarak, yüksek bir binada hareket eden dalgaların hızlarını, yansımalarını ve büyümelerini irdelemiştir. Enerji kaybında, sönüme ek olarak hareket eden dalgaların birden fazla yansımalarının da etkisinin olabileceğini öne sürmüştür (Westergaard 1933).

1963'te Kiyoshi Kanai ve Shizuyo Yoshizawa, elastik bir katmanda çoklu dalga yansımalarını yorumlayarak yapılardaki sismik dalga yayılımını araştırmışlardır. Yapının en üst seviyesinde yapmış olduğu harekete bağlı olarak tabanındaki ya da alt katlarındaki sismik hareketi tahmin etmek üzere basit bir formül geliştirmişlerdir (Kanai ve Yoshizawa 1963). Teorik olarak elde edilen sonuçlar yapıların gerçek tepkilerinden elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Araştırmacılar deprem sırasında oluşan sönümlemeyi zemine doğru olan enerji kayıplarına bağlamışlardır. Ayrıca, incelenen yapının saçılımsız olduğunu, bu nedenle dalganın bir yönde (dikey) yayıldığını ve dalganın frekanstan bağımsız olan faz hızıyla hareket ettiğini varsaymışlardır. Çıkarılan formülde eğilme deformasyonları dikkate alınmayıp, binanın sadece kayma biçiminde şekildeğiştirme yaptığı kabul edilmiştir. Yazarlar, bir binanın sismik titreşiminin çoklu dalga yansımaları ışığında incelenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Geliştirilen formülden elde edilen sonuçlar, Los Angeles'taki 54 katlı çelik bir binada yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir (Ebrahimian ve ark. 2016). Geliştirilen formül ile binanın tepesindeki bir sismik kayda bağlı olarak binanın ara katlarındaki görelî kat ötelemelerinin tahmin edilebileceği ortaya konmuştur.

1964'te Kanai ve Yoshizawa, bir ağırlık ve iki kemer barajın tabanındaki sismik hareket etkisini belirlemek için bir formül geliştirmişlerdir (Kanai ve Yoshizawa 1964). Çalışmada geliştirilen formül kullanarak hesaplanan tepkiler ile gerçek gözlemler arasında iyi bir uyum sağlandığı belirtilmiştir.

1964'te Kanai, yapıları tasarlamak için dalga yayılım prosedürünü uygulayarak, deprem hareketi nedeniyle yapıdaki şekildeğişiklikler ile sismik dalgaların hız genlikleri arasındaki oran ilişkisini göstermiştir. Yapısal hasarlar üzerindeki zeminin etkisini irdeleyerek, maksimum hasarın sert zemine oturan yüksek binalarda tabanda gerçekleştiğini, yumuşak zemine oturan yüksek binalarda ise belirli yüksekliklerde gerçekleştiğini belirtmiştir (Kanai ve Yoshizawa 1964).

1976'da Sami F.Masri, viskoz olarak sönmelenen mesnet hareketine bağlı dinamik etkiye maruz kalan Bernoulli - Euler kirişlerinin geçici tepkisi için kesin bir çözüm tanımlamıştır (Masri 1976). Çalışmada kirişin boyutlarının ve dalga yayılma süresinin kirişin dinamik tepkisi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

1976'da Scanlan uzaysal olarak dağıtılmış bir yüzey hareketini irdelemiştir (Scanlan 1976). Yapısal tepki davranışı üzerinde farklı frekansların etkilerini araştırarak, rijit büyük bir temele sahip yapı için daha yüksek frekansların etkisinin elenmesini önermiştir.

1977'de Newmark ve arkadaşları serbest alana oturan bir yapının sismik hareket girdisi için serbest alan hareketi ortalama tekniğinin kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Çalışma, Kaliforniya'daki Kern County (1952) ve San Fernando (1971) depremleriyle ilgili, Hollywood Storage binasının bodrum katında ve yakındaki otoparkta ölçülen yer hareketinin analizine dayanmaktadır. Önerilen ortalama tekniğini kontrol eden iki ana parametre, binanın boyutu ve giriş dalgalarının hızıdır. Ortalama alma süreci, hareketi yöneten parametrelerle ilgili olan bir geçiş süresi boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada, ortalama öteleme ve burulumsal deprem veri dalgalarını belirleyebilmek için basitleştirilmiş teknik sunulmaktadır (Newmark ve ark. 1977).

1977'de Werner ve arkadaşları (Werner ve ark. 1977), yapıların üç boyutlu tepkisi üzerinde geçiş süresinin mekânsal değişimini ve sismik dalgaların yansıma açısını belirlemeyebilmek için bir yöntem geliştirmiştir. Hedef yapılar rastgele konfigürasyonlu elastik yapılarıdır. Temeller rijit ve elastik yarı ortam üzerinde rastgele yerleştirilmişlerdir. Tahrik hareketi keyfi olarak seçilen frekanslarda ve çeşitli yansıma açıları  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  olan cisim veya yüzey dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yer üstü yapısı sonlu elemanlar kullanılarak modellenirken, zemin-yapı etkileşimi süreklilik yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Araştırmacılar önerdikleri yöntemi SH dalgalarının etkisindeki basit tek açıklıklı köprü-zemin sistemine uygulamışlardır. Çalışmada, yüksek ve düşük frekanslarla tahrik edilen köprünün öteleme ve eğilme tepkisi üzerinde, sismik dalgaların hareketinin önemi ortaya konulmuştur.

1997'de Iwan, atım tipi yakın saha güçlü yer hareketlerine maruz sürekli kayma kiriş modelinin doğrusal tepkisine dayalı bir ötelenme tepki spektrumu önermiştir (Iwan 1997). Tek serbestlik dereceli bir sistemin doğrusal davranışı ile karşılaştırıldığında, sürekli bir model, ara katların ötelenmesinin iyi bir şekilde tahmin edilmesine olanak verebilir. Kirişteki maksimum kayma şekildeğiştirmesi ya da ara katlardaki ötelenmeler basitleştirilmiş modelde sismik dalga'nın çoklu yansımaları kabul edilerek ifade edilmektedir. Yazarlar, sözkonusu sismik dalgaların tamamen tabandan yansıtıldığını kabul etmişlerdir. Geliştirilen ötelenme spektrumunun uygulanabilirliği, Hall ve arkadaşları (Hall ve ark. 1995) tarafından önerilen prototip modellerin analizleri ile doğrulanmıştır. Yakın saha yer hareketleri kullanılmıştır.

1988'de Todorovska ve arkadaşları (Marija I Todorovska ve ark. 1988), dalga yayılmasının iki boyutlu modellerin dinamik tepkisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, 2B dalga yayılmasını, 2B izotropik kayma plaka yapısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Model boyutlarının sonlu olması nedeniyle, modelde dağılılabilirlik özelliği dikkate alınmıştır. Dikkate alınan modellerin biri için farklı sınır ve süreklilik denklemleri kullanıldığından dağılım eğrileri farklı şekillerde elde edilmiştir.

1989'da Todorovska ve Trifunac, geniş yapının iki boyutlu anizotropik kayma plakası modelinde SH dalgalarının hareket etmesinin etkilerini incelemişlerdir. (M I Todorovska

ve Trifunac 1989). Tabanda uygulanan monokromatik SH dalgası, dikkate alınan yarı ortamın yüzey seviyesindeki serbest alan yer değiştirmesine şekliindedir. Modelde, analitik kapalı form çözümlenmesi kullanılabilmiştir. Binanın özelliklerine bağlı olarak model üzerinde kayma dalgası hızlarını hesaplamak için basitleştirilmiş denklemler önermişlerdir. Sunulan çözümler, gelen dalganın faz hızının bina içerisindeki kayma dalgalarının hızına oranı ve model yüksekliğinin uzunluğuna oranı gibi boyutsuz parametreler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Çalışmalarında, zeminden binaya enerji transferinde binanın boyuna doğrultuda eşdeğer kayma hızı ve yer hareketinin faz hızı arasındaki oranın önemini vurgulamışlardır.

1989'da Todorovska ve Lee, sismik dalga yayılmasının, perde duvarlı ve perde çekirdekli binaların dinamik tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (M I Todorovska ve Lee 1989). Dikkate aldıkları yapının yatay yük taşıyıcı sistemi, çevre perde duvarları ve merkez çekirdek perdeden oluşmaktadır. Çalışmada zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmamıştır. Monokromatik SH dalgalarının yerdeğiştirme tepkileri için analitik çözümler geliştirilmiştir. Çalışma, binanın tepesindeki gerilmeler, yerdeğiştirmeler ve deformasyonlar için elverişsiz olan binanın yatay hareketlerini azaltmada çevre perde duvarlarının rolünü irdelenmiştir. Çalışmada, merkezi çekirdeğin burulma yer değiştirmelerini azaltmada hiçbir etkisinin olmadığı, tersine binanın serbest uçlarının çok daha fazla düşey harekete izin verebileceği sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar, uzun bina için simetrik olarak çevresel kaymaya dayanıklı elemanlardan oluşan bir yatay taşıyıcı sistemi önermişlerdir.

1990'da Todorovska ve Trifunac, yumuşak kata sahip bir binanın davranışını belirlemeye çalışmışlardır (M I Todorovska ve Trifunac 1990). Model, yumuşak katı dikkate almak için farklı malzeme özelliklerine sahip iki katmandan oluşan iki boyutlu bir kayma plağı modeliydi. Model, monokromatik anti-düzlem bir etkiye maruz bırakılmıştır. Zemin-yapı etkileşimi göz ardı edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, yumuşak katın üst katlar için bir izolatör gibi davrandığı belirtilmiştir. Ancak dikkate alınan yumuşak katın kolonlarında aşırı büyük ötelenmeler meydana gelmiştir. Bu durumda sismik dalgaların enerjisinin zeminden tüm binaya aktarılması mümkün olamamaktadır. Ayrıca, tabanın faz dışı hareketi, büyük genlikli burulma titreşimlerinin de oluşmasına neden olabilmektedir.

Araştırmacılar, yumuşak kata sahip binalarda P-Δ etkisini dikkate alarak tasarımıda, dalga yayılmasının göz önünde bulundurulmasını önermişlerdir.

1991'de Gai ve arkadaşları (Cai ve Lin 1991), birbirine bağlı narin elemanlara sahip bir yapının dinamik tepkisini hesaplamak için teorik bir yöntem geliştirmişlerdir. Her eleman çok kanallı bir dalga yönlendiricisi gibi kabul edilerek, tüm yapı bu dalga yönlendiricilerinden oluşan bir ağ sistemi gibi değerlendirilmiştir. Dalga yayılımını prizmatik bir çubukta inceleyerek ilk dalga yönlendiricisinden başlayarak, ardından N tane çubuğun ortak bağlantıları dikkate alınarak saçılma matrisleri oluşturulmuştur. Bundan sonra, sınır yüzeylelerinde dalga saçılımı, sıfır yerdeğiştirme, sıfır kuvvet ya da bunların kombinezonlarını dikkate alarak incelenmişlerdir. Araştırmacılar önerdikleri yöntemi, kendisine bağlı ikincil bir çerçeve sisteme sahip iki boyutlu bir çerçevenin dinamik tepkilerini belirlemek amacıyla uygulamışlardır. İncelenen yapı dış etkiye maruz bırakılmıştır. Dalga saçılım matrisi, dikkate alınan dalga yönlendirici elemana gelen ve elemandan giden dalga ile ilgilidir. Dalga saçılım matrisi yönteminin geleneksel transfer yöntemine göre avantajı kararlı olmasıdır. Önerilen yöntemin, bir yapının belirli herhangi bir yerindeki hareketleri değerlendirmek için etkin olduğu belirtilmektedir.

Darbe şeklindeki yakın saha yer hareketleri büyük ve hızlı yer değiştirme atımlarına neden olsa da, geleneksel tasarım yöntemlerinde genellikle ihmal edilmektedir. 1995 yılında Hall ve ark. (Hall ve ark. 1995), yakın saha darbe şeklindeki sismik yer hareketlerinin esnek çerçeve ve taban yalıtımlı binanın dinamik tepkisi üzerindeki etkisini ele almışlardır. Yazarlar, 7.0 büyüklüğünde bir deprem zaman değişimine maruz kalan basitleştirilmiş bir tek tip makaslı kiriş modeli kullanılmalı. Çalışmada, dalganın zemine yayılması ihmal edildi ve sismik dalgaların tabandan tamamen yansıdığı kabul edildi. Yer hareketinin kaynağı (blind thrust) ters bir faydı. Çelik çerçeveli binalarda kaynaklı birleşimler gibi bazı yerlerde yüksek kırılma potansiyeli olan yaklaşık olarak doğrusal olmayan bir tepki gözlemlendi.

Çok katlı yapılarda hasarı belirlemek ve tespit etmek için dalga yayılım yaklaşımının kullanılması ilk olarak Erdal şafak tarafından gerçekleştirildi (Şafak 1998, Şafak 1998). Sismik dalga yayılmasının dinamik tepkisi için ayrıık bir zaman formülasyonu geliştirdi.

Her kat, birden çok katmandan oluşan zemin modeli gibi ayrı bir katman olarak modellenmiştir. Sönümlenme etkisi dikkate alınmış, temel dönme etkisi ise ihmal edilmiştir. Önerilen yaklaşımda zemine geri yansıyan enerjinin dağılımı dikkate alınmıştır. Dinamik davranışın belirlenmesinde, katmanlar arasında düşey olarak yayılan dalganın intikal süresi ve bitişik katmanlar arasındaki arayüzde ilerleyen ya da yansıyan dalgaların katsayıları kullanıldı. Yansıtılan ve iletilen dalgaların katsayıları için, arayüz seviyesinde bir katmandan diğerine geçerken dalgaların genliğindeki ve fazındaki değişiklikler ele alındı. Arayüz seviyesinde toplanmış kütle olmadığından, katsayılar sabit olarak belirlenmiştir. Bu arada, arayüz seviyesi, kat seviyesindeki gibi toplanmış bir kütleyle sahip olduğunda sözkonusu katsayılar, frekansın bir fonksiyonu olacaktır. Böylelikle her katman, biri iletilen dalga, diğeri yansıyan dalga için olmak üzere iki denklemlerle temsil edilmiştir. Böylece ana kayaya bitişik olan ilk zemin tabakasından başlayarak tüm tabakaların denklemleri iteratif olarak çözülmüştür. Çalışmada, dalga yayılım yönteminin modal analiz yöntemlerine sağlam bir alternatif olarak düşünülebileceği belirtildi. Ayrıca titreşim yöntemine göre zemine yansıyan dalgadan kaynaklanan enerji kaybının etkisini dikkate alabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, binadaki hasarı belirlemek ve tespit etmek için üstün bir olanak sağlamasıdır. Sunulan yaklaşım yapıların doğrusal olmayan tepkisini değerlendirmek için de kullanılabilir. Dalga yayılma yönteminin kullanılması, söz konusu binadaki enerji akışının izlenmesini sağlamaktadır.

1998 yılında, güçlü depremler sırasında kaydedilen geoteknik borehole array dizisinden basitleştirilmiş bir dalga formu elde etmek için yeni bir yöntem olan "normalize girdi-çıkışı minimizeasyonu" (NIOM) yöntemi Haddadi ve Kawakami (Hideji Kawakami ve Haddadi 1998) tarafından önerildi. "NIOM" yöntemi ile, frekans alanında giriş ve çıkış hareketlerinin ortalama kare değerlerinin toplamı en aza indirilmektedir. Yazarlar, zaman alanında basitleştirilmiş dalga formlarını elde etmek için ters Fourier dönüşümünü kullandılar. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar, arazide S-dalgası hızlarının jeofizik ölçümlerinden elde edilen sonuçlarıyla iyi bir uyum sağladı. "NIOM" yönteminin, normal olarak gerçek yer hareketlerinin eşlik ettiği gürültüye daha az duyarlı olması gibi geleneksel birim impuls tepkisi ve çapraz korelasyon yaklaşımlarına göre avantajları olduğu belirtilmiştir. "NIOM" yöntemi, sistemin doğrusallığının

incelenmesini gerektirmekte, ancak tek boyutlu olması için herhangi bir hüküm yoktur. "NIOM" yöntemi kayma dalgası hızı için kabul edilebilir değerler verdiği için zemin modelleri için iyi sonuçlar vermektedir.

2000 yılında Şafak ve Harmsen, sismik tehlikeyi ve incelenen yapının tepkisini belirlemek için enerji akış formülasyonları sundular (Şafak ve Harmsen 2000). Enerji akışı, birim zamanda bir yüzeyden geçen enerjinin miktarıdır. Dalga yayılma hızı ve kinetik enerji terimleriyle ele alınabilir. Sarsıntının yoğunluğunu ve zemin büyütmesini ifade etmektedir. Düşey olarak yayılan deprem dalgalarının etkisindeki çok katlı yapıların analizi için, bina içerisindeki enerji akışı, her katta ilerleyen ve yansıyan enerji akışları cinsinden sunulabilir. Geliştirilen formülasyonlar her katta meydana gelen tepkinin zamanla değişimini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, önerdikleri yöntemi iki zemin katmanına mesnetlenen 10 kattan oluşan bir yapının analizinde uyguladılar.

2001 yılında Ivanovic ve arkadaşları (Ivanovic ve ark. 2001), herhangi bir yapıdaki hasarlı alanların, bina içinden geçen sismik dalgaların intikal/varış süresindeki gecikmelerin ölçülmesi suretiyle, gözlemlenebileceğini öne sürmüşlerdir. Söz konusu yöntemlerini California, Van Nuys'da yedi katlı bir binaya uygulamışlardır. Bina, 1994 yılında Northridge depreminde ağır hasar görmüş bir binadır. Çalışmada, binanın hizmet dışı kaldığı Northridge 1994'te depremi ve daha sonra maruz kaldığı 4 depremin (San Fernando, Whittier-Narrows, Landers, Big Bear) bina üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bir çift izleme istasyonundan yayılma süresi, görüntü çapraz korelasyon fonksiyonu ile belirlendi. Yöntem hasarsız bölgelerde uzun intikal sürelerinin oluşmasına neden oldu.

2001 de Todorovska ve arkadaşları (Maria I Todorovska 2001) ara katları ve döşemeleri temsil etmek için yumuşak ve sert katmanlara sahip homojen anizotropik ve yatay olarak katmanlı kayma plakalarının kullanıldığı, iki boyutlu dalga yayımlı yapı modellerini oluşturdu. Ayrıca ilgili modeller için oluşturulan dağılım eğrilerini de incelediler. Dalga yayılım yöntemini uygulayarak, 1994 yılında Northridge depremi sırasında ağır hasar gören 7 katlı otel binasının gözlemlenmiş sismik tepkisini incelediler.



2001'de Todorovska ve arkadaşları (Todorovskaa ve ark. 2001), (malzeme özelliklerinden ya da ortam titreşim testleri ile ölçümlerden elde edilen modal frekanslar ile dalga sırasının formülasyonundan elde edilen) yayılan dalgaların faz hızları ve tasarım özellikleri arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığını incelediler. Çalışmada, kolonlardan ve döşemelerden dalğanın geçişinde düşey ve yatay faz hızının belirlenmesine odaklanıldı. İncelenen otelin uç kolonlarından düşey olarak yayılan dalgaların faz hızı ile Kuzey-Güney ortam titreşim testinde kaydedilen düşey kayma hızı arasında anlamlı bir uyum olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca bir kayıttan diğerine de orantı elde edilmiştir. Otelin döşemeleri boyunca yatay olarak yayılan dalgalar dikkate alındığında da aynı uyum gözlenmiştir. Zemin kat seviyesinde, çıkarılan faz hızı ile Love dalgalarının faz hızı arasında da uyum görülmüştür. Çalışmada Whittier-Narrows, Landers, Big Bear ve Northridge olmak üzere 4 deprem nedeniyle kaydedilen tepkileri kullandılar. Makalede önerilen yöntemin, dalga yayılma yöntemlerini kullanarak hasarı tespit etmek için yapısal sağlık izlemesi için faydalı olabileceği belirtilmiştir.

2003 yılında Trifunac ve arkadaşları (Trifunac ve ark. 2003) kayıt cihazları yerleştirilmiş binadan elde ettikleri düşük frekanslı dalgaları incelediler. Yazarlar, 7 katlı otelin hasarlı ve hasarsız bölümlerindeki dalgaların özelliklerini araştırmışlardır. Otelin ilk üç katı hasarsız olup, üst katları ise ağır hasar görmüştür. Ana olay olarak Northridge ve iki artçı şok dahil olmak üzere 11 deprem kaydı kullanılmıştır. Northridge depreminde çok ağır hasar meydana geldiğinden, otel hizmet dışı bırakılmıştır. Çalışma, Northridge depremi ve iki artçı sarsıntıyla ilgili olarak otelin sadece hasarlı tarafında ampirik dalga sayılarında önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Diğer 8 depremde ise bu artış eğilimi otelin hasarsız ve hasarlı kısımlarında gözlenmedi. Hasar gören bölgenin dalga sayısındaki bu artış, hasarlı bölgelerden geçen dalga hızlarındaki azalmaya bağlanmıştır. Bu dalgalar, meydana gelen hasarın neden olduğu süreksizliklerde dağıldı. Yazarlar, ilgilenilen yapıdaki hasarın yerini tespit etmek için dalga numarası araştırmasının kullanılabilirliğini önermişlerdir.

Deprem yüklerine maruz kalan binaların dinamik tepkisinin araştırıldığında, dalga yayılım yöntemi zemin yapı etkileşimi de dikkate alınarak çeşitli uygulamalar gerçekleştirildi. SH, P ve SV dalgaları etkisinde; elastik zemine (Trifunac 1972, Wong ve

Trifunac 1974) mesnetlenen ya da poroelastik zemine mesnetlenen yapıların davranışlarını (Maria I Todorovska 2009a, Maria I Todorovska ve Al Rjoub 2006) ve doğrusal olmayan dalgalar altında zemin-yapı etkileşimini dikkate alma amacıyla (Dym ve Williams 2007, 2007, Gicev ve Trifunac 2007a, 2007b) çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2003 yılında Kawakami ve Oyunchimeg, gerçek binada izlenen bir dizi güçlü yer hareketi kaydına "NIOM" yöntemini uyguladılar (Hideji Kawakami ve Oyunchimeg 2003, Oyunchimeg ve Kawakami 2003). Binaların her bir katını zemin modellerindeki gibi katmanlar şeklinde dikkate aldılar. Söz konusu binalar, yükseklik ve yatay taşıyıcı sistem bakımından farklıydı. Yazarlar Los Angeles 19 katlı ofis binası, UCLA Math - 28,8 m yüksekliğinde Bilim binası, San Francisco, Kaliforniya'da 60 katlı çelik bina olan Transamerica binası ve Kaliforniya'daki 10 katlı Burbank konut binasında güçlü yer hareketi kaynaklı dalga yayılımını irdelediler. Yazarlar, kat kütlelerine, kolonların toplam rijitliğine ve katın yüksekliğine bağlı olan çerçeve sistemdeki kayma hızı için Clough ve Penzien yaklaşık denklemini kullandılar. Önerilen yöntem, her kat için basitleştirilmiş dalga modellerinde iki önemli pik sağlamıştır. Bu iki pik, iletilen dalgayı ve yansıyan dalgayı temsil ediyordu. İlerleyen ve yansıyan dalgalar aynı varış zamanlarına sahip görünüyordu. Elde edilen dalga varış süreleri, her katın yapısal özelliklerini göstermiştir. Bina boyunca dalga büyümesi ile sönümleme arasında ters bir ilişki vardı, öyle ki sönümleme arttıkça büyütme etkileri azaldı. Çalışma, bina boyunca ilerleyen ve yansıyan dalgaların genlik oranının sönümleme oranı ile ele alınabileceğini ortaya koydu.

2005 yılında, Kawakami ve Oyunchimeg, dört gerçek bina (Los Angeles 14 katlı Hollywood deposu, Los Angeles, 5 yeraltı katı ve Los Angeles içeren 52 katlı ofis binası ve 3 katlı ticari bina) da NIOM yöntemini kuvvetli yer hareketi kayıtlarını analiz etmek için kullandılar. Yazarlar ayrıca geliştirdikleri yöntemi, elastik yedi serbestlik derecesine sahip kayma-yay modelinde uyguladılar. Bu basitleştirilmiş model, hasarlı Van Nuys-7 katlı otel binasını temsil etti. Çalışma, NIOM yönteminin binadaki hasarın derecesi için iyi bir gösterge sağlayabileceğini, öyle ki bir deprem sırasında dalga geliş süresinin hasarlı elemanlarda hasarsız elemanlara göre arttığını gösterdi. Bu arada elastik bir modelde (H Kawakami ve ark. 2005) sabit kalmaktadır.

2006'da Snieder ve Şafak, Pasadena, California'daki Robert A. Millikan Kütüphanesinde sönümleme ve kayma dalgası hızını incelediler (Snieder ve Safak 2006, Snieder ve ark. 2006). Çalışılan binanın özelliklerini belirlemek için interferometri tekniğini kullandılar. Yazarlar, bodrumda ya da tepe noktasında kaydedilen sinyalle her kattaki dalgaları frekans alanında çözdüler. Çözülmüş dalgalar, iletilen (yukarı giden) dalgalardan ve yansıyan (aşağı giden) dalgalardan oluşmaktadır. Çalışmada, binanın tepkisinin doğrusal ve zamanla değişmediğini kabul edilmektedir. Makalede, yayılan dalganın sönümlenmesinin binanın temel modlarıyla uyumlu olduğu sonucuna varıldı.

2007'de Kohler ve arkadaşları (Kohler ve ark. 2007), impuls tepki fonksiyonlarını elde etmek için donanımlı aletlere sahip 17 katlı çelik moment çerçeveli bir binanın deprem kayıtlarını kullandı. Nihai ortalama impuls tepki fonksiyonunu elde etmek için 20 yerel ve bölgesel depremden bir veri seti kullanıldı. Yazarlar, alt temel seviyesindeki impuls tepki fonksiyonlarının ortalamasını almak için Gauss eğrilerini kullanmış, daha sonra elde edilen fonksiyon sonlu eleman modeline giriş yer ivmesi olarak kullanılmıştır. ETABS'de binanın 3 boyutlu sonlu eleman modeli için doğrusal elastik dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizle, modeldeki yayılan atımlarla, sismik veri setinden hesaplanan impuls tepki fonksiyonlarının yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Binanın burulma tepkisi için impuls tepki fonksiyonları, hem sismik veri seti, hem de 3 boyutlu sonlu eleman modeli için hesaplanmıştır.

2008a'da Todorovska ve Trifunac, binalardaki hasarı tespit etmek için iyi bir araç olarak dalga intikal/varış sürelerindeki değişikliği ele almışlardır. 1979'da Imperial Valley depreminden sonra ciddi şekilde hasar gören ICS Binası aracılığıyla ani sismik dalga zamanlarındaki değişiklikleri araştırdılar. Çalışmada, hasar olayından önceki, esnasındaki ve sonrasındaki olmak üzere üç zaman aralığı dikkate alındı (Maria I Todorovska ve Trifunac 2008a). Çalışmanın konsepti, hasar meydana geldiğinde dalga yayılma hızının azalması ve hasarlı elemanlar aracılığıyla dalga hareket süresinin artmasıdır. Yazarlar, ilgili bina için mevcut saha izleme verileriyle eşleşen rijitlikte bir azalma tahmin etmişlerdi. Makalede ayrıca, basitleştirilmiş üniform bir kayma kirişi için dalga ilerleme süresinden binanın ankastre tabanlı frekansının tahmin edilmesi sonucu belirtildi. Daha sonra 2008b'de yazarlar, 24 yıl boyunca 11 depreme maruz kalan 7 katlı

betonarme binada (Maria I Todorovska ve Trifunac 2008b) hasar yerlerini tespit etmek için aynı yöntemi kullandılar. Genişletilmiş çalışma, önceki çalışmalarıyla iyi bir uyum göstermiş olup, sistemin frekansının, yapıdaki hasar oluşumunu tespit etmede yararlı olmayabileceği, dolayısıyla herhangi bir yakın hasarla bile değişebileceği ortaya konmuştur. Bu arada, sismik dalga intikal/variş sürelerinden elde edilen ankastre tabanlı frekans, gözlemlenen hasarla iyi bir uyum gösterdi.

2009b'de Todorovska, sistem tanımlamasının analizi üzerine yeni bir çalışma sundu. Bu çalışmada, geliştirilen model, 2B zemin-yapı etkileşiminin yatay tepkisi ile birleştirilen temel dönmesinin etkisini dikkate almıştır. Analitik model, dairesel rijit bir temele oturan bir kayma kirişi dikkate alınarak gerçekleştirildi. Temelin elastik, homojen bir yarı ortama gömüldüğü kabul edildi. Çalışmada, yatay tepkilerden elde edilen transfer fonksiyonlarının ve impuls tepki fonksiyonlarının taban dönme etkisinden dolayı zemin özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Zemin-yapı etkileşiminin impuls tepki fonksiyonlarının genliğini de etkileyebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma ayrıca geniş aralığının önemini ortaya koymuştur. Yani uygun bir geniş aralığı düşünüldüğünde, zemin-yapı etkileşimi, impuls tepki fonksiyonundan elde edilen atım intikal/variş süresi üzerinde bir etkiye sahip olmayacaktır. Çalışmada, ankastre taban frekansına ve önerilen modeldeki diğer unsurlarla olan ilişkisine bağlı olarak temelin dönme frekansı belirlendi (Maria I Todorovska 2009b). Nisan 2009'da Todorovska, önceden önerilen sistem tanımlama yönteminin bir uygulamasını sundu. Çalışmasında, zemin-yapı etkileşimi ve temelin dönme etkisi dikkate alındı. Geliştirilen yöntemde, binanın tabanında ve tepesinde kaydedilen saha izleme verileri kullanıldı. Doğrulan bina 9 katlı betonarme taşıyıcı sistemli, Pasadena, California'daki Millikan Kütüphanesi idi. Yöntem yapısal ankastre taban frekansı ve dönme frekansı olmak üzere iki önemli frekans ortaya koydu. Çalışmada, sözkonusu iki önemli frekansın genliğe bağlı olduğu belirtildi. Ayrıca yıllar geçtikçe ankastre temel sistem frekansının azaldığı da belirtilmiştir. Dönme frekansı, genliğe bağlı olarak azalmış ancak yine de geri dönebilir olmuştur (Maria I Todorovska 2009c).

2011'de J. Zhang ve arkadaşları (J. Zhang ve ark. 2011), binaların deprem yüklerine maruz kaldıklarında dinamik tepkilerini araştırmak için dalga yayılım teorisine dayanan

bir yaklaşım önerdi. Yazarlar, birincisi genelleştirilmiş impuls tepkisi ve ikincisi frekans tepkisi için olmak üzere iki fonksiyon belirttiler. Daha sonra, dalga yayılmasının sarsılmış binaların sismik tepkisine etkisinde olduğu gibi binaların titreşim özelliklerinin gösterilmesinde önemli olan bu fonksiyonların deterministik ve stokastik özelliklerini irdelediler. Çalışmada, tek boyutlu dalga yayılımı belirtilmiştir. Bina modelinde, kolonlar ve duvarlar için üniform kayma kirişi, döşemeler için ise toplanmış kütle yaklaşımları kullanılmıştır. Makalede, üniform kayma kirişi modelinin binalardaki dalga yayılımını belirlemek için kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

2011 de Zhang ve arkadaşları sismik etki altında çok katlı bir binada tek boyutlu dalga yayılımını incelediler (R. R. Zhang ve ark. 2011). Kolonlar ve duvarlar bir dizi kayma kirişi, döşemeler ise toplanmış kütle olarak modellendi. Binanın bir yerindeki dalga tepkisi, zaman ve frekans alanlarında yerdeğiştirme ve ivme gibi impulsif bir hareketin konumundan türetilmektedir. Çalışma, bina özelliklerine bağlı olarak genelleştirilmiş impuls ve frekans tepki fonksiyonun özelliklerini göstermiştir. İki örnek modellenmiştir. Bunlardan biri, Kaliforniya, Pasadena'daki on katlı Millikan Kütüphanesinin dalga temelli karakterizasyonudur. Diğeri, sismik dalga tepkilerinde stokastik döşeme-kolon kütle oranı, kat yüksekliği ve sismik girdinin etkisinin analizidir.

2012 yılında, Todorovska ve arkadaşları (M I Todorovska ve Rahmani 2012), tek boyutlu bir yapı için yapısal sistem tanımlaması için daha önce (Maria I Todorovska ve Trifunac 2006) önerilen yönteme bağlı olarak bir formül geliştirdi. Yöntem ayrıca bir yapıda deprem kaynaklı hasarları tespit etmek için önerilen bir prosedürü de içeriyordu. Bu yöntemin anahtar noktası, bina boyunca dalga intikal/varış süresindeki değişimin tespit edilmesiydi. Dalga intikal/varış süresi, yapının çeşitli yerlerindeki impuls yanıtlarından hesaplandı. Bina katmanlı bir kayma kirişi olarak modellendi, ardından impuls tepki fonksiyonları türetildi. Makalede, prosedürün daha esnek binalar için sağlam olduğu ve hataların uzun intikal/varış mesafesi için daha küçük görüldüğü sonucuna varıldı. Çalışmada aynı zamanda, yapıdaki sönümlenme ve temel dönmesine bağlı olan impuls tepkisi fonksiyonu sunuldu.

2013 yılında Nakata ve arkadaşları (Nakata ve ark. 2013), binanın dinamik tepkisi belirleyebilmek için sismik dalgayı çeşitli kat seviyelerinde ayırtmak için ayrışmayan interferometri yöntemini kullandılar. Yazarlar ayrıca ayrışmayan interferometri yönteminin bina sönüm oranı hakkında bilgi verebileceğini gösterdiler. Çalışma, ayrışmayan interferometrisinin, binanın tepkisini zemin-yapı etkileşimi nedeniyle dalga yayılma etkisinden ayırmadığı için geleneksel çapraz-korelasyon interferometresini aştığını gösterdi. Diğer taraftan, çapraz-korelasyon interferometri, gerçek bir binada gözlemlenen gerçek hıza kıyasla daha düşük hızda fiziksel olmayan dalganın yayılmasına neden oldu. Ayrıca çapraz-korelasyondan elde edilen dalga formu sönümlenmesi, dalgaların hareket mesafesiyle eşleşmedi. Yazarlar ayrıca, hedef alıcıda kaydedilen dalgalarla Japonya'daki 8 katlı bir betonarme binanın tüm kat seviyelerindeki dalga kayıtlarını ayırttılar. Hedeflenen binanın içindeki farklı yerlere birçok alıcı (sanal kaynak) yerleştirdiler. Sanal kaynağın altındaki yapıdan bağımsız olan kesik bir binanın tepkisi değerlendirildi. Kesilen binanın avantajı, yerel yapıyı ve yerel hasarı değerlendirmeye yardımcı olabilmesiydi. İki haftalık izleme çalışmaları sırasında, yazarlar önerilen yöntemi Fukushima'daki binada 17 sismik kayda uyguladılar. Çalışmada, hareket eden dalgaların ve temel modun tabanındaki hızları hesaplamak için koda dalga interferometresi kullanıldı. Çalışma, elde edilen hızların, tespit edilen sismik kayıtların maksimum ivmesi ile negatif bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma, bina boyunca tespit edilen en büyük ivmeye sahip depremler için, bina yüksekliği boyunca hesaplanan impuls tepki fonksiyonlarının tepe noktaları arasında hiçbir uyum olmadığını ortaya koymuştur. Çalışma ayrıca, indirgeme eğilimlerinin, iletilen dalga ilerleme sürelerinden elde edilen dalga hızlarının, maksimum ivmeye karşı kod dalga interferometresinden hesaplananlar arasında farklı olduğunu gösterdi.

2013 yılında Ebrahimian ve Todorovska, Timoshenko kiriş modelini kullanarak, dalga yayılmasının, yüksek katlı binanın dinamik tepkisi üzerindeki etkisini araştırdı (Rahmani ve Todorovska 2013). Geliştirilen analitik model, eğilmeden kaynaklanan dalga dağılımını dikkate almıştır. Yazarlar, kirişin farklı seviyelerinde transfer fonksiyonlarını ve impuls tepki fonksiyonlarını türetmişlerdir. Daha sonra önerilen modelin 9 katlı betonarme binada geçerliliği irdelenmiştir. Makalede Timoshenko kiriş modelinin yüksek

binadaki dalga yayılımını belirtmek için kullanılabilmesi ve yapısal sağlık izleme için yararlı bir araç olarak düşünülebileceği sonucuna varılmıştır

2013 yılında Silva ve arkadaşları (P. B. Silva ve ark. 2013) dalga sayılarına ve dalga yayılma modlarına bağlı olarak dalga kılavuzlarının sayısal spektral eleman matrislerinin oluşturulmasında uygulanabilirliğini doğrulamışlardır. Sonraki parametreler, yapısal bir giriş diliminin transfer matrisinin özdeğer analizinden elde edilmiştir. Dilim, geleneksel olarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir katı eleman olarak modellenmiştir. Geliştirilen işlem Dalga Spektral Sonlu Eleman olarak adlandırılmıştır. Çalışmada, sayısal ve analitik dağılım eğrileri arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Dalga sayılarını ve dalga yayılma modlarını kullanarak; dalga kılavuzlarının sayısal spektral eleman matrisleri elde edilmiştir. Bu elemanlar daha sonra, girişin serbest bağlı sınır koşulları altında zorlanmış tepkisini hesaplamak için kullanıldı, boyuna ve enine üniform kuvvetler ve üniform olmayan boyuna kuvvetler dâhil olmak üzere farklı yük koşullarına maruz bırakıldı.

2014 yılında Nakata ve arkadaşları (Nakata ve Snieder 2014), 8 katlı betonarme binayı izlemek için ortam titreşim verilerine ayrışmayan interferometri yöntemini uygulamışlardır. Ayrışan dalgaları göstermek için bir dizi modeli geliştirdiler. Çalışma, ortam titreşimlerinden kaynaklanan ayrışmayan dalga biçimlerinin negatif ve pozitif zamanlar için sıfır olmayan bir değer olduğunu gösterdi. Çalışmada, ayrışmamış dalga formlarının genlik gecikmesinin yapı içi sönümlenme ve zemin bağlantısına bağlı olduğu gösterilmiştir. Binanın deprem yükleri altında doğrusal olmayan tepkisi nedeniyle, deprem etkisinden hesaplanan hızlar, ortam titreşimlerinden elde edilenlerden farklıdır.

2015'a'da Rahmani ve arkadaşları deprem yükleri altında binaların yapısal sağlığı için kullanılacak bina tepkisinin zaman hızı analizi için bir interferometrik algoritma geliştirdiler (Rahmani ve ark. 2015). Önerilen algoritma ile binanın yüksekliği boyunca düşey olarak yayılan dalgaların hızını dikkate alarak bu hızlardaki değişiklikleri tespit ettiler. Bu nedenle hız değerindeki değişiklikler, yapısal sağlık izleme için iyi bir geri bildirim sağlayabilir. Yöntem, zemin-yapı etkileşiminin etkisini dikkate almadı. Geliştirilen algoritma, 1971'deki San Fernando depreminden sonra, Sherman Oaks'ta,

California'daki 12 katlı bir betonarme binadaki hasarları tespit etmek için uygulandı. Analitik model, her katmanı 6 katı temsil eden iki katmanlı kayma kirişinden oluşuyordu. Katmanlı kayma kirişinin, perde duvarlı betonarme binaların sismik tepkisi için iyi bir yaklaşım olduğu belirtildi. Önerilen işlemin sonuçları, sistem frekansı, görece kat ötelenmesi ve giriş gücü analizi ile karşılaştırıldı. Yazarlar, genelleştirilmiş zaman hızı analizinin, güçlü bir yer hareketine maruz kaldıktan sonra binadaki hafif hasarlarını bile tespit etmek için sağlam bir yöntem olarak kabul edilebileceği sonucuna varmışlardır.

2015b'de Ebrahimian ve Todorovska, erken sismik uyarı sistemi olarak hizmet verebilecek binalar için yapısal sağlık izleme alanında yeni bir gelişme sağlamışlardır. Kuvvetli yer hareketi oluşmadan önce hassas ekipmanın ne zaman kapatılacağına karar vermede yardımcı olabilir. Geliştirilen işlemde, dönme ataletinin yanısıra eğilme ve kayma deformasyonları da dikkate alınmıştır. Kiriş rijitliği parametresini tahmin etmek için yayılan dalgalar üzerinde en küçük kare eşleşmesini kullandılar. Bu yeni modelin üstünlüğü, eğilme davranışı nedeniyle dalganın dağılmasını hesaba katmasıdır. Yükseklik boyunca bina özelliklerinde meydana gelen değişiklikler dikkate alındı. İşlem, Los Angeles şehir merkezinde bulunan 54 katlı, tam ölçekli bir çelik çerçeve binada uygulandı. Analitik olarak önerilen işlemin sonuçları, 1994 (Rahmani ve Todorovska 2015) Northridge depremi sırasında kaydedilen saha izleme verileriyle karşılaştırıldığında iyi bir uyum sağlamıştır.

2018 yılında Michela ve Guéguenb, perde duvarlı binalarda uygulanacak bir kayma kirişi modeli için bir düzeltme faktörü geliştirdiler (Michel ve Gueguen 2018). Önerilen düzeltme faktörü, hem kayma hem de eğilme tepkisi için binaların karmaşık davranışını temsil etmek için kullanıldı. Çalışmada temel frekanslar, gözlemlenen atım hızı, kayma ve eğilme tepkisinin göreceli etkileri ile ilişkilendirdi. Yazarlar, bu faktörün, kayma kirişi modeline ilişkin frekanslarda %60 oranında karşıladığını göstermişlerdir. Çalışma, yüksek hızların çerçeve yapılardan ziyade perde duvarlı binalarda tespit edildiğini göstermiştir.

2018'de Cheng ve arkadaşları çok katlı çerçeve binaları sonsuz periyodik modeller olarak modellemek için yeni bir yaklaşım önermiştir (Cheng ve ark. 2018). Yazarlar, geliştirilen modelin dağılım denklemini çözmek için Bloch-Floquet teoremini ve Durum-Uzay-



Transfer-Matris-Metodunu kullanmışlardır. Daha sonra önerilen işlem, dağılım eğrilerinin ve grup / faz hız eğrilerinin incelendiği 6 katlı betonarme karkas yapı örneğine uygulandı. Çalışmada, malzeme özellikleri, geometri ve sönümle ilgili çeşitli parametrelerin dağılım ilişkileri üzerindeki etkisi araştırıldı. Frekans alanındaki sonlu periyodik çerçeve yapının dinamik tepkisinin temelini araştırmak için harmonik ve zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Çalışmada, dış etkinin ana frekans bölgesi geçen bantlara düştüğünde dinamik tepkilerin çok büyük olduğu, sönümlenme bölgelerine düştüğünde ise küçük olduğu sonucuna varılmıştır. Çok benzer yapısal özelliklere sahip olan yüksek katlı bir binadaki katların tekrarlanması, onu elastik bir malzeme gibi davranabilen neredeyse periyodik tek boyutlu bir yapı gibi düşünülmesine yol açmaktadır.

2018 de Aydın Özmütlu ve arkadaşları, tekrarlanan katların dalga yayılımına etkilerini basit bir model üzerinde incelediler (Ozmütlu ve ark. 2018). Yüksek katlı bina modelinde döşemeler rijit toplanmış kütleler olarak, döşemeler arasındaki yapısal elemanlar (perde duvarlar ve kolonlar) Timoshenko kirişinin parçaları olarak modellenmiştir. Önerilen modelin tek boyutlu periyodik yapı gibi davranması bekleniyordu. Model, temel öteleme ve dönmesine maruz bırakıldı. Dikkate alınan yapının tipik özellikleri için dağılım ve transfer fonksiyonları ile impuls tepki fonksiyonları elde edildi.

Özetle, literatürde dalga yayılımı analitik modeller ve aletler yerleştirilmiş binalardan gelen saha izleme verileriyle doğrulanan farklı teoriler kullanılarak irdelendi. Bununla birlikte, pratik mühendislik anlamında fiziki olarak dalga yayılmasının sayısal tartışması daha az irdelenmiştir.

## **2.2. Rayleigh Sönümü**

Yapıların dinamik tepkilerini değerlendirirken sönümü temsil etmek üzere klasik sönüm ya da Rayleigh sönümü olarak tanımlanan sönüm modeli 1877 den itibaren yaygın olarak kullanılmaktadır (Rayleigh 1877). Model, iki modal periyoda veya frekansa ait sönüm oranı elde etmek için seçilen iki sabit alfa ve beta katsayıları ile kütle ve rijitlik matrislerinin doğrusal bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Rayleigh sönümünün,

yapıların elastik dinamik davranışları ile ilişkili sönümlenme olgusunu temsil edebileceği ortaya konmuştur. Pek çok çalışmada Rayleigh sönümü kabul edilebilir sonuçlar almak için kullanılmasına rağmen, bu modelin tepki spektrumu ve zaman tanım alanı analizleri için gerçekçiliği sorgulanmıştır. Yapıların doğrusal olmayan tepkisi araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Bernal 1994, Charney 2008). Doğrusal olmayan analiz durumunda başlangıç ya da hedef rijitliğe bağlı olarak bir rijitlik oranının olup olmadığı hususunda yorumlar bulunmaktaydı (Priestley ve Grant 2005, Smyrou ve ark. 2011). Rijitlik oranının, daha yüksek modlarla ilişkili dinamik tepki üzerinde büyük bir etkiye sahip olması beklenmektedir. Bununla birlikte, daha yüksek modların dinamik tepkisinde sönümün etkisi nispeten daha az araştırılmıştır. Gelişmiş aletlerin yerleştirildiği binalardan gelen saha izleme verileri, yüksek modlarla ilişkili sönümün yaklaşık bir perspektifini çizmek için iyi bir kaynak sağlamaktadır. Çelik ve çelik takviyeli binalar da dahil olmak üzere ve 4 ile 40 katlı çeşitli katlara sahip 17 binanın sonuçları değerlendirilerek, daha yüksek modlarda sönümün, birinci modun sönümünden daha yüksek olduğu ortaya konmuştur (Yokoo ve Akiyama 1972). Ancak, araştırmacılar sönüm oranı ile ilgili frekanslar arasında bir ilişki kuramadılar. 1975'te Hart ve Vasudevan, 1971'deki San Fernando depremine maruz kalan aletler yerleştirilmiş 12 binanın çatısı ile bodrum katı arasında bir transfer fonksiyonu aracılığıyla ilk üç mod şeklinde sönümü belirlemeyi başardılar (Hart ve Vasudevan 1975). Yazarlar, başlangıç modu şekli ile diğer yüksek mod şekilleri sönümleri arasında önemli bir fark tespit edemediler. Bu çalışma, daha sonra, modun frekansı ile uygulanan etkinin frekansı arasındaki uyuma bakılmaksızın tüm mod şekilleri için aynı sönüm oranı kullanmanın önünü açmıştır (Chopra, O'Rourke 1976). 1976'da O'Rourke, birinci, ikinci ve üçüncü modun sönümleri arasında önemli bir fark olduğu sonucuna vardı. Çalışması, Hart ve Vasudevan (Hart ve Vasudevan 1975) 'den gelen deprem verilerini de içeren ortam ve zorlanmış titreşimler üzerinde gerçekleştirildi. Burada, transfer fonksiyonu genliğinin ve spektral tepe noktalarının, 1972'de Stagner ve Hart tarafından sunulan birçok faktörden etkilenebileceğini belirtmekte fayda bulunmaktadır. Fourier spektrum genliğinin düzeltilmesinin, ilgili gürültünün ve spektral frekansların çözünürlüğünün, elde edilen transfer fonksiyonunun spektral zirvelerinin doğruluğunu güçlü bir şekilde yönettiği sonucuna varmışlardır. Diğer bir deyişle gerçek olmayan hususlar sönüm değerleri için yanıltıcı sonuçlara yol açabilmektedir (Stagner 1972).

Stagner ve Hart, aracılığıyla araştırmacıların, transfer fonksiyonunun basitleştirilmiş tekniğini kullanmanın aşırı tahmin edilen sönüm oranı değerleri verdiğini belirttiler (Jeary 1986, Miranda 1992). 1981'de, yüksek modların sönümünün, daha yüksek modal frekansı ile başlangıç modu frekansı arasındaki normalleştirilmiş bir orana bağlı olarak rijitlik orantılı değerini belirlemek için çalışmalar gerçekteştirildi (Ahsan Kareem 1981). Önerilen formülün güvenilirliği 1996 da test edilmiş ve onaylanmıştır (A Kareem ve ark. 1996). Çok düşük genlikli etkiler altında daha yüksek modların sönümü, birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Satake ve ark. 2003). Ancak oldukça düşük genlikli etkilere göre belirlenen sönüm değerlerinin deprem etkisi için uygun olmadığı konusunda genel bir fikir birliğine varılmıştır (Çelebi 1996, Çelebi ve ark. 1993).

### **2.3. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşeninin Ölçeklendirilmesi**

Son 30 yılda meydana gelen kuvvetli yer hareketlerinde yapısal hasarlarda yatay bileşenin yanında düşey bileşen de yapısal hasarlarda etkili oldu. Özellikle Loma prieta 1989, Northridge 1994, Kobe 1995, Kocaeli 1999 ve Düzce 1999 gibi kuvvetli depremlerde düşey bileşenin büyüklüğü de önemli boyutlara ulaşmıştır. Bu durum birçok araştırmacıyı düşey bileşenin özellikleri ve yapıya zarar verme potansiyeli konusunda çalışmaların gerçekteştirilmesine yol açmıştır. (Bozorgnia ve Niazi 1995, Elnashai ve Di Sarno 2008, Erdik 1999, Hudson ve ark. 1996, Papazoglou ve Elnashai 1996, W. Silva 1997)

Yer hareketinin düşey bileşeni yatay bileşeni ile karşılaştırıldığında genel olarak daha yüksek bir frekans içeriğine ve daha düşük enerjiye sahip olduğu belirtilebilir. Hızlı sönümlenmesine rağmen, düşey sismik bileşenin etkisi yüksek bir frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Dolayısıyla, bu kısa periyot aralığı içindeki kısa periyotlu yapılar üzerinde yıkıcı etkileri olabilmektedir (Elnashai ve Di Sarno 2008). Düşey yer hareketi için yukarıda belirtilen farklılıklar, yatay ve düşey yer hareketlerinin farklı baskın dalga türlerine sahip oldukları ile açıklanabilir.

Yakın alan yer hareketleri için düşey bileşeninin özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve çeşitli azalım ilişkileri geliştirilmiştir. Literatür çalışmaları, en büyük

düşey ivme bileşeninin en büyük yatay ivme bileşenini geçebildiğini belirtmektedir (Ambraseys ve Douglas 2003, Bozorgnia ve Campbell 2004, Cork ve ark. 2016, Elgamel ve He 2008, Kunnath ve ark. 2008, Radiguet ve ark. 2009, W. Silva 1997)

Literatürde, yer hareketinin yatay ve düşey bileşenlerinin fonksiyonelliğini belirlemek için, en yüksek yer ivmesi ya da spektral ivme için düşey bileşenin yatay bileşene oranı (V/H) kullanılmaktadır. Burada V yer hareketinin düşey bileşenini, H ise yer hareketinin yatay bileşenini temsil etmektedir. Bu oran, düşey bileşenin yapısal tepki üzerindeki etkisini irdelemenin yanında, deprem kaynağına olan uzaklık, depremin büyüklüğü ve zemin farklılıkları gibi parametrelerin irdelemede de kilit rol oynamıştır. (V/H) oranı, düşey tepki spektrumları için ampirik yer hareketi tahmin denklemleri GMPEs geliştirmek için ve yatay tepki spektrumuna bağlı olarak düşey tepki spektrumunun belirlenmesinde kullanıldı (Akkar ve ark. 2013, Bommer ve ark. 2011, Bozorgnia ve Campbell 2004, 2015, 2016, Elgamel ve He 2008, Gülerce ve ark. 2019, 2011, Kalkan ve ark. 2004, Khansefid 2020, PEERReport2013/24 2013). Yer hareketinin hem düşey hem de yatay bileşenlerinin azalım oranında ve spektral içeriğinde gözlenen farklılıklar, (V/H) spektral oranı kullanılarak yorumlandı. Bu oranın yerel zemin sınıfına, saha-kaynak mesafesine ve spektral periyoda duyarlı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca sadece yumuşak zemin alanları için depremin büyüklüğüne de duyarlı olduğu belirtilmektedir. Kısa periyotlar için (yüksek frekans aralığı), (V/H) spektral oranının belirgin bir zirvesi vardır. (V/H) spektral oranının, literatürde belirtilen 2/3 oranını, orta ve uzun periyotlar için neredeyse 2/3'ten daha az olmasına rağmen, özellikle yakın alan sahalarında aşabildiği belirtilmektedir (Bozorgnia ve Campbell 2004)

Günümüzde üç boyutlu sismik analiz artık bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Yakın zamanda yapılan araştırmalar, düşey yer hareketlerinin, geniş kiriş açıklıkları olan binalar ve otoyol köprüleri ile yakın alan yer hareketine maruz kalan normal yapıların dinamik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği belirtilmektedir (Kunnath ve ark. 2008, Papazoglou ve Elnashai 1996). Benzer şekilde, hem yapısal olmayan elemanların hem de bina türü olmayan yapıların, depremin düşey tepkisine duyarlı olabildiği belirtilmektedir (ASCE/SEI 7-16 2017). Literatürün önemli bir kısmı depremin yatay bileşeninin seçilmesine ve ölçeklendirilmesine ( $H_{SF}$ ) ilişkindir (Beyer ve Bommer

2007, Fahjan 2008, Harden ve ark. 2009, Kalkan Erol ve Chopra 2010, Kwong ve Chopra 2015, NIST GCR 11-917-15 2011). Oysa düşey yer hareketinin ölçeklendirilmesi konusundaki çalışmalar oldukça kısıtlı kalmıştır. ASCE7-16, düşey ve yatay bileşenleri için aynı ölçeklendirme faktörünün kullanılmasını önermektedir (ASCE/SEI 7-16 2017). Buna karşılık, ulusal deprem tehlikelerini azaltma programı (NEHRP) ve Federal acil durum yönetimi ajansı (FEMA), yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirme faktörünü  $V_{SF}$  "sorunlu bir konu" olarak belirtmiştir (FEMA P-750 2009, NIST GCR 11-917-15 2011). Bu nedenle düşey yer hareketlerinin ölçeklendirme faktörünün de kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekli olmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan başlıcaları aşağıdaki üç grupta toplanabilir:

- 1) Sismik yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirilmesi.
- 2) Yüksek yapılarda dalga yayılmasının sayısal olarak modellenerek irdelenmesi.
- 3) Yüksek binaların açık ve kapalı dinamik tepki analizleri için dikkate alınan Rayleigh Sönümünün irdelenmesi

Yukarıda belirtilen üç grup çalışma için kullanılan yöntemler, gerçekleştirilen uygulamalar ve elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

#### 3.1. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşeninin Ölçeklendirilmesi

Deprem kayıtlarının iki yatay ve bir düşey bileşeninin analizlerde dikkate alınması güncel yönetmeliklerde öngörülmektedir. Analizlerde dikkate alınacak deprem yer hareketinin yatay bileşeninin seçilmesi ve ölçeklendirilmesi konusunda oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Fakat düşey bileşen için benzer çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. ASCE 7-16 yatay ve düşey bileşen için aynı ölçeklendirme faktörünün kullanılmasını tavsiye etmektedir. Tez kapsamında yatay bileşen için kullanılan ölçeklendirmelerin, düşey bileşen için de uygun olup olmadığı araştırılmaktadır. Araştırmada farklı zemin sınıfları, farklı deprem büyüklükleri ( $M_w$ ) ve farklı Joyner-Boore mesafeleri ( $R_{JB}$ ) için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranındaki değişimler incelenmektedir. Çalışmada kullanılan veri seti (düşey ve oryantasyondan bağımsız geometrik döndürülmüş (GMRotD50) %5 sönümlü tepki spektrumuna sahip 6409 ana şok kaydından oluşmaktadır.

Deprem kayıtları, PEER kuvvetli yer hareketi veri tabanından alınmıştır. Söz konusu veri tabanı +24000 deprem kaydı içermektedir. Bu kayıtlar Filtreleme işlemine tabir tutulmuştur. Filtrelemede deprem büyüklüğü ( $M_w$ )  $\geq 5.5$ , Joyner-Boore mesafesi ve çeşitli zemin sınıfları (A, B, C ve D) parametreleri kullanılmıştır. Artçı sarsıntı kayıtları hariç tutulmuştur. Uygulanan filtreleme işlemleri sonucunda 6409 deprem kaydının kullanılmasına karar verilmiştir. Her kaydın bağımsız geometrik döndürülmüş (GMRotD50) yatay tepki spektrumları ile düşey tepki spektrumuna sahip olması nedeniyle, söz konusu tepki spektrumlarının her biri, ASCE 7-16 ve EC8'den önerilen tasarım spektrumlarına belirli bir periyot aralıklarında ölçeklendirildi. Çalışmada, geniş

bir bina yelpazesini temsil etmek için 4 periyot aralığı dikkate alınmıştır. Kabul edilen kaydın ölçekleme faktörü 4'ten küçük olarak dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, dikkate alınacak verinin, yatay tepki spektrumu için kabul edilebilir bir ölçeklendirme faktörü değerine ve aynı zamanda kabul edilebilir düşey tepki spektrumuna sahip olması gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan sembollerden  $V_{SF}$  yer hareketinin düşey bileşeninin ölçeklendirme faktörünü,  $H_{SF}$  ise yatay karşılığının ölçeklendirme faktörünü göstermektedir.  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre yaklaşımını incelemek için  $(V/H)_{PGA}$ , düşey bileşenin en yüksek yer ivmesinin yatay karşılığının en yüksek yer ivmesine oranını ifade etmektedir.

Tezin bu kısmında düşey sismik bileşeni ölçeklendirmek ve bununla ilgili bir bağlantı önermek için istatistiksel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Güçlü yer hareketi kayıtlarının çokluğundan dolayı, düşey yer hareketinin ölçeklendirme faktörünün yatay karşılığının ölçeklendirme faktörüne oranı ASCE 7-16 ve Eurocode 8 (EC8) kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Düşey ve yatayda yönden bağımsız geometrik döndürülmüş GMRotD50 tepki spektrumuna sahip 6409 ana şok kaydı dikkate alınmıştır. Sönüm oranı için %5 kullanılmaktadır (Boore ve ark. 2006, PEER-NGA-West2database). Bu çalışmada ele alınan her zemin sınıfı için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için en uygun modeli tahmin etmek için doğrusal olmayan bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, ölçekleme faktörünün oranını  $(V/H)_{PGA}$  oranının bir fonksiyonu olarak sunan basitleştirilmiş denklemlerle son bulmaktadır. Geliştirilen denklemler sağlam istatistiklerle doğrulanmaktadır.  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının standart sapması, kabul edilebilir bir ortalama değerle paralel olarak azalmaktadır.

Sismik yer hareketi, genliğe dayalı olarak veya ilgilenilen bir hedef tepki spektrumuna göre spektral ölçeklendirme ile ölçeklenebilir (ASCE/SEI 7-16 2017). Literatür çalışmaları, gerçek kaydedilen yer hareketlerinin (1) zaman tanım alanında ve (2) frekans tanım alanında spektral ölçeklendirilmesi için, bu çalışmanın kapsamı dışında olan, iki yöntem olduğunu göstermektedir.

Zaman tanım alanında yer hareketini ölçeklendirmenin felsefesi, yalnızca belirli bir periyot aralığı içinde, bir hedef tepki spektrumunda gerçek zamanlı geçmiş kayıtların tek tip olarak ölçeklendirilmesiyle özetlenebilir. Seçilen periyot aralığı, esasen ilgili yapının sismik tepkisine katılan titreşim periyotlarına göre tanımlanmaktadır (ASCE/SEI 7-16 2017). Tek seferlik geçmiş bir kaydı veya birden çok zaman tanım alanı kaydını ölçeklendirmek için kullanılabilir (Fahjan 2008). Uygulanan işlemin temel anahtarı, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, gerçek zamanlı geçmiş kaydın ölçeklendirilmiş tepki spektrumu ile hedef tepki spektrumu arasındaki varyasyonu mümkün olduğu kadar azaltmaktır.

$$D = \int_{T_i}^{T_m} [S_F \times S(T)_a^{real} - S_F \times S(T)_a^{target}]^2 \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $S(T)_a^{real}$  gerçek ivme tepki spektrumunu,  $S(T)_a^{target}$ , hedef ivme tepki spektrumunu,  $S_F$  ölçeklendirme faktörünü,  $T$  titreşim periyodunu,  $T_m$ , maksimum ölçeklendirme periyodunu ve  $T_i$ , minimum ölçeklendirme periyodunu göstermektedir.

Gerçek ve hedef ivme tepki spektrumları arasındaki farkı ( $D$ ), mümkün olduğu kadar azaltmak için, bu fonksiyonun ilk türevi sifıra eşitlenmektedir:

$$\frac{d|D|}{d|SF|} = 0 \quad (3.2)$$

Yukarıdaki (3.1) ve (3.2) denklemleri birleştirerek, belirli bir periyot aralığı için ölçeklendirme faktörü  $SF$  aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir:

$$SF = \frac{\sum_{T_i}^{T_m} (S_a^{real} \times S_a^{target})}{\sum_{T_i}^{T_m} (S_a^{real})^2} \quad (3.3)$$

Depremi düşey bileşeninin ölçeklendirilmesi ve değerlendirilmesi için, dünya genelinde  $M_w > 5.5$  olan 6409 kuvvetli yer hareketi ana şok kayıtlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. PEER-NGA-West2 veri tabanı tarafından sağlanan dosyalarda sunulan



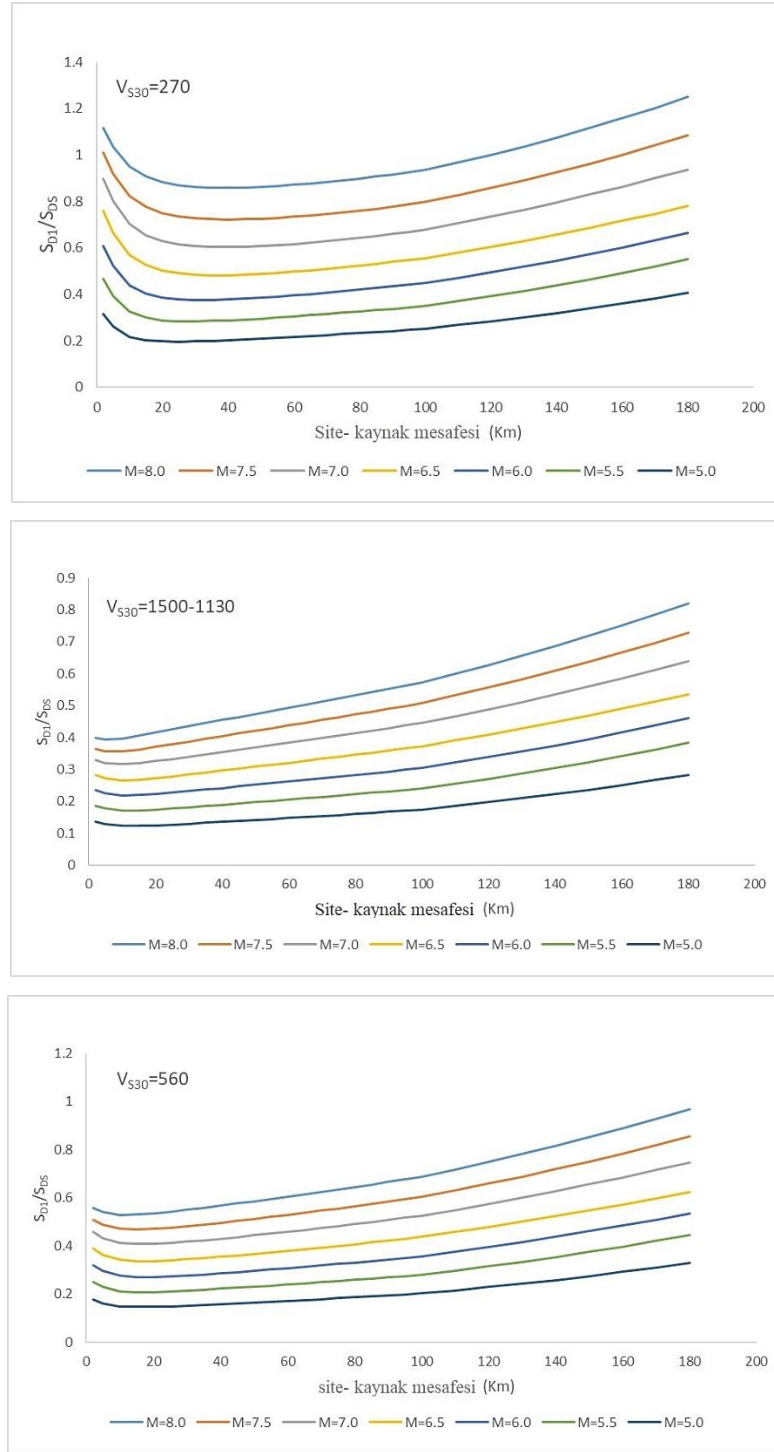
deprem verileri kullanılmıştır. Her kayıt (PEER-NGA-West2database) için %5 sönümlü GMRotD50 tepki spektrumu ve düşey tepki spektrumu bulunmaktadır.

### 3.1.1. Hedef Tepki Spektrumu

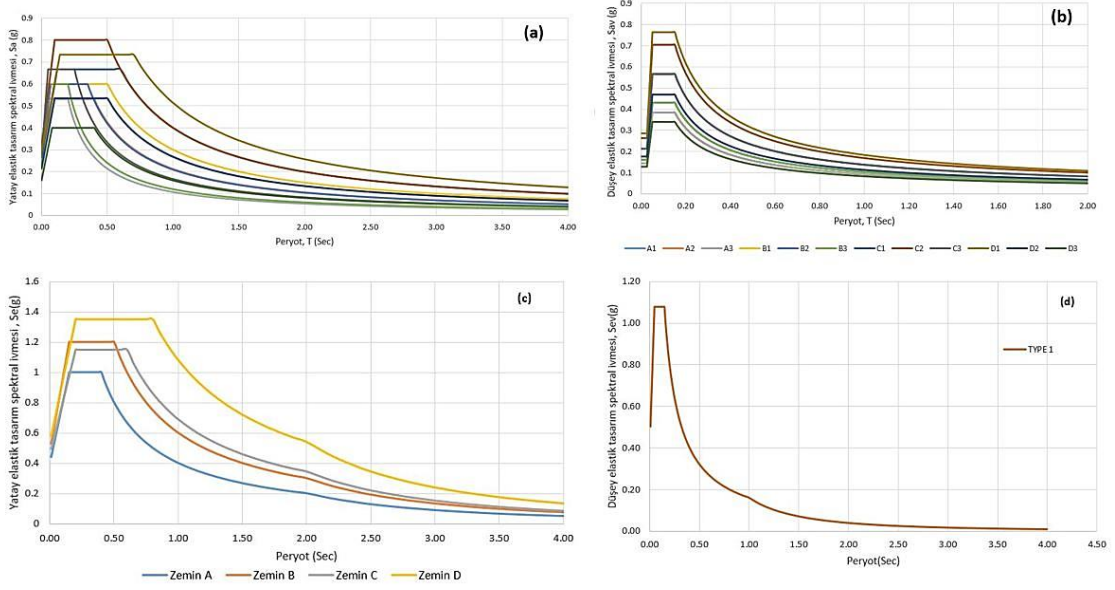
Ölçeklendirmek amacıyla, ASCE 7-16 hedef tepki spektrumu, farklı  $S_{D1}/S_{DS}$  oranları kullanılarak kategorize edilebilir.  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ , sırasıyla kısa periyot ve 1 saniye tasarım spektral tepki ivme parametrelerini temsil etmektedir. Ölçeklendirme süreci,  $S_{D1}/S_{DS}$  oranına bağlı olan hedef tepki spektrumu tarafından yönetilmektedir. PEER-NGA west2 veri tabanı tarafından sağlanan gelişmiş ampirik yer hareketi tahmin denklemleri GMPEs kullanılarak deprem büyüklüğüne ve bölgeden kaynağa göre farklı zemin sınıfları için  $S_{D1}/S_{DS}$  oranı çizilmektedir (Şekil 3.1). Bu çalışmada, deprem büyüklüğü aralığı  $M_w = 5.5-8.0$  olarak seçilmiştir. NEHRP2003 koşullarına göre ilk 30 metre içindeki ortalama kayma dalgası hızı  $V_{S30}$  dikkate alınarak farklı zemin sınıfları için önerilen  $S_{D1}/S_{DS}$  oranları Çizelge 3.1 de gösterilmektedir. EC8 aracılığıyla ölçeklendirme amaçlarıyla ilgili olarak,  $a_g = 0.4$  için %5 sönüm oranına sahip birinci tip elastik tepki spektrumu, hedef tepki spektrumu olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.2, bu çalışmada hedef spektrum olarak kullanılan ASCE 7-16 ve EC8 tepki spektrumlarını göstermektedir.

**Çizelge 3.1.** NEHRP2003 koşullarına göre  $V_{S30}$  dikkate alınarak, farklı zemin sınıfları için  $S_{D1}/S_{DS}$  oranları.

Zemin tipi	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
$V_{S30}$	1500	1500	1500	1130	1130	1130	560	560	560	270	270	270
$S_{D1}/S_{DS}$	0.5	0.4	0.2	0.5	0.35	0.2	0.6	0.5	0.25	0.7	0.5	0.4



**Şekil 3.1.** Ana GMPE ampirik yer hareketi tahmin denklemlerini kullanarak, deprem büyüklüğüne ve deprem bölgesinden kaynağa mesafeye göre farklı zemin sınıfları için  $S_{D1}/S_{DS}$  değerleri.



**Şekil 3.2.** Bu çalışmada kullanılan %5 sönüm oranına sahip hedef tepki spektrumları. (a)  $SD1/SDS$  oranının farklı değerleri için ASCE 7-16 yatay tasarım tepki spektrumları. (b) Uyumlu ASCE 7-16 dikey tasarım tepki spektrumları. (c)  $a_g = 0.4$  için EC 8 Tip elastik dikey tepki spektrumu. (d) EC 8 tip 1 elastik dikey tepki spektrumu.

### 3.1.2. Üç boyutlu dinamik analizde gerçek yer hareketinin spektral ölçeklendirilmesi için periyot aralığı

Üç boyutlu analizde uygulanacak bir yer hareketini ölçeklendirmek için belirli bir periyot aralığı belirtilmelidir. Bu aralık, dikkate alınan yapının hedeflenen sismik tepkisine önemli ölçüde katkıda bulunan tüm periyotları kapsamalıdır. Seçilen periyot aralığı, yapının temel periyotunda dikkate alınan en büyük depremi  $MCE_R$  sembolize etmelidir. Doğrusal olmayan analizde doğal bir husus olan periyot uzamasını da hesaba katmalıdır. Daha yüksek modların kısa periyotları da belirtilen periyot aralığına dahil edilmelidir (ASCE/SEI 7-16 2017). Bu aralığın üst sınırı,  $1.5T_1 - 2T_1$  'den büyük veya eşit olmalıdır. Burada  $T_1$ , yatay ilk modun en büyük periyodudur. Yer hareketinin dikey bileşenini ölçeklendirmek için, periyot aralığı sınırları ilk dikey periyot  $T_1$  cinsinden tanımlanmaktadır. Zaman aralığının alt sınırı, %90 kütle katılım oranı koşulunu yerine getirmek için gereken yeterli sayıda mod şekline göre belirlenmektedir. Bu nedenle, yatay bileşenin ölçeklendirilmesi için belirlenen alt sınır  $0.2T_{1S}$  değerini geçmemelidir. Burada  $T_{1S}$ , sismik tepkinin yatay ilk modunun en küçük titreşim periyodudur (ASCE/SEI 7-16 2017, EN1998-1 2004). Dikey sismik bileşenin ölçeklendirilmesi için belirlenen alt sınır, 0.1 saniyeden büyük olan veya önemli ölçüde dikey kütle katılım oranının oluşmasıyla

uyumlu en düşük düşey süreden daha az olmamalıdır (ASCE/SEI 7-16 2017). Ölçeklendirme faktörünün kabul edilen değeri 4'ü geçmemelidir (Fahjan 2008). Çok çeşitli bina yapılarını kapsamak için, çizelge 3.3. de gösterildiği gibi dört periyot aralığı dikkate alınmıştır.

**Çizelge 3.2.** Periyot aralıklarının sınırları.

Periyot aralıkları	Yatay		Düşey	
	$T_1$	$T_m$	$T_1$	$T_m$
R1	0.1	0.5	0.025	0.5
R2	0.1	1.5	0.025	0.8
R3	0.1	2	0.025	0.8
R4	0.1	2.5	0.025	0.8

Bir yer hareketinin belirli periyot aralığında hedef tepki spektrumu için genlik ölçeklendirme işlemi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Her kayıt için, düşey ve RotD50 tepki spektrumları, sırasıyla hedef düşey ve yatay tepki spektrumlarına ölçeklenir.
- Düşey ve yatay tepki spektrumları için ölçeklendirme faktörleri hesaplanır.
- Ölçeklendirme faktörü 4'ten fazla olan kayıtlar kabul edilmez. Bu nedenle, kabul edilen kaydın hem düşey hem de RotD50 tepki spektrumları için kabul edilebilir bir ölçeklendirme faktörüne sahip olması gerekir.
- $V_{SF}/H_{SF}$  oranının değişimi, geniş bir  $M_w$ ,  $R_{JB}$  aralığı ve farklı zemin sınıfları üzerinden tahmin edilir.
- $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre yaklaşımı incelenir.  $(V/H)_{PGA}$  oranı, düşey kuvvetli yer hareketinin özellikleri üzerinde önemli bir yönetim rolüne sahiptir.

Bu çalışmanın önemi, kabul edilebilir bir ortalama değere paralel olarak  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının standart sapmasını en aza indirebilecek basitleştirilmiş bir matematiksel model tahmin etmesidir.

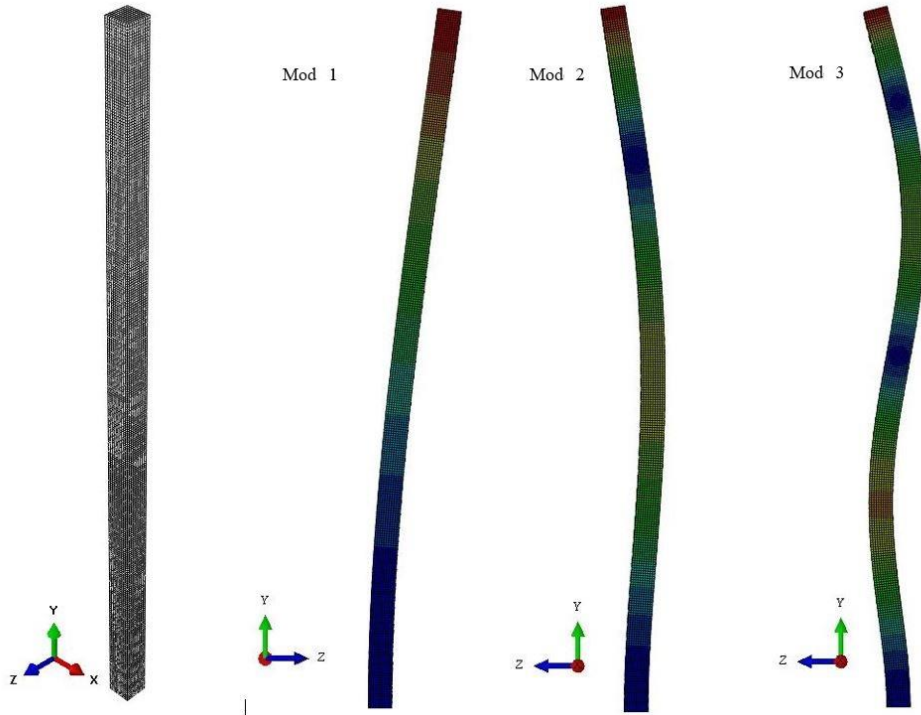
### 3.2. Yüksek Yapılarda Dalga Yayılımının Sayısal Olarak İncelenmesi

Son yirmi yılda, yüksek binalar aktif bir araştırma alanı olmuştur. Yapısal dinamik tepki, etki yüksekliği ve dalga azalım sürecini yöneten doğal parametreler üzerindeki dalga yayılım etkisinin yorumlanmasında bazı hususların irdelenmesi gerekli olmaktadır. Yapılardaki dalga yayılımı için daha önce de belirtildiği gibi aletlerin yerleştirildiği binalardan gelen saha izleme verileriyle doğrulanan teorik ve analitik model çalışmaları bulunmaktadır. Ancak bu konunun sayısal modelleme ile incelenmesi kısmında aynı durum söz konusu olmadığından, tez kapsamında bu konu üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Uygulamada çalışan inşaat mühendisleri tarafından kullanılan sonlu elemanlar programlarının bu çalışmada da kullanılması tercih edilmektedir. Böylece, dalga yayılma etkisi dikkate alınarak, yüksek yapının dinamik tepkisinin pratik bir şekilde değerlendirilmesi de yapılabilecektir.

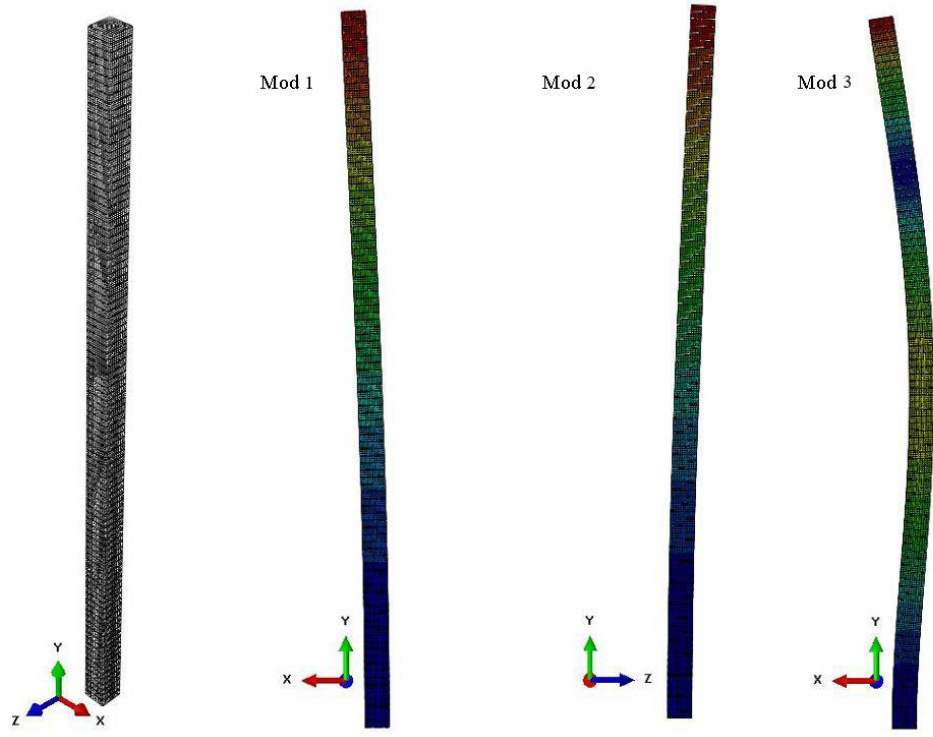
Sayısal modellemenin esnekliği, herhangi bir sınır koşulu ile herhangi bir yük durumu altında gerçek bina davranışının irdelenebilmesini sağlamaktadır. ANSYS, LS-DYNA ve ABAQUS gibi doğrusal olmayan analizler de yapabilen yazılımlar, ısı, patlama ve gerilme dalgaları gibi dalga yayılımını temsil etmek için çeşitli mühendislik dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, doğrusal olmayan yapısal analiz programlarının yüksek binalarda dalga yayılımının ne şekilde temsil edilebileceği araştırılmaktadır. Bu bölümde, matematiksel türetmelerden ziyade yüksek binalardaki dalga yayılımını fiziksel olarak açıklamaya odaklanılmıştır. Faydalı olması için, burulma etkisinden kaçınmak için rijitliğin ve kütlelerin yükseklik boyunca simetrik olarak dağıldığı idealleştirilmiş bir model üzerinde dalga yayılımını ortaya koymak daha uygun olmaktadır. Bu kısımda sönümden kaynaklanan enerji kaybı, zemin-yapı etkileşimi ve temel dönmesinin etkisi ihmal edilmektedir.

Çalışmada, boyuna ve enine atım benzeri dalgaların her biri 300 m yüksekliğinde ve 100 kattan oluşan yapının sürekli ve ayırık modelleri üzerinde dalga yayılımı incelenmektedir. Sürekli model, 10 m x10 m kare kesitli basit homojen bir mega sütundur. Model, 30000 katı elemandan ve 36421 düğüm noktasından oluşmaktadır. Modelde süreksizlik, malzeme özellikleri ve kesit özellikleri ile ifade edilmektedir. Ayırık

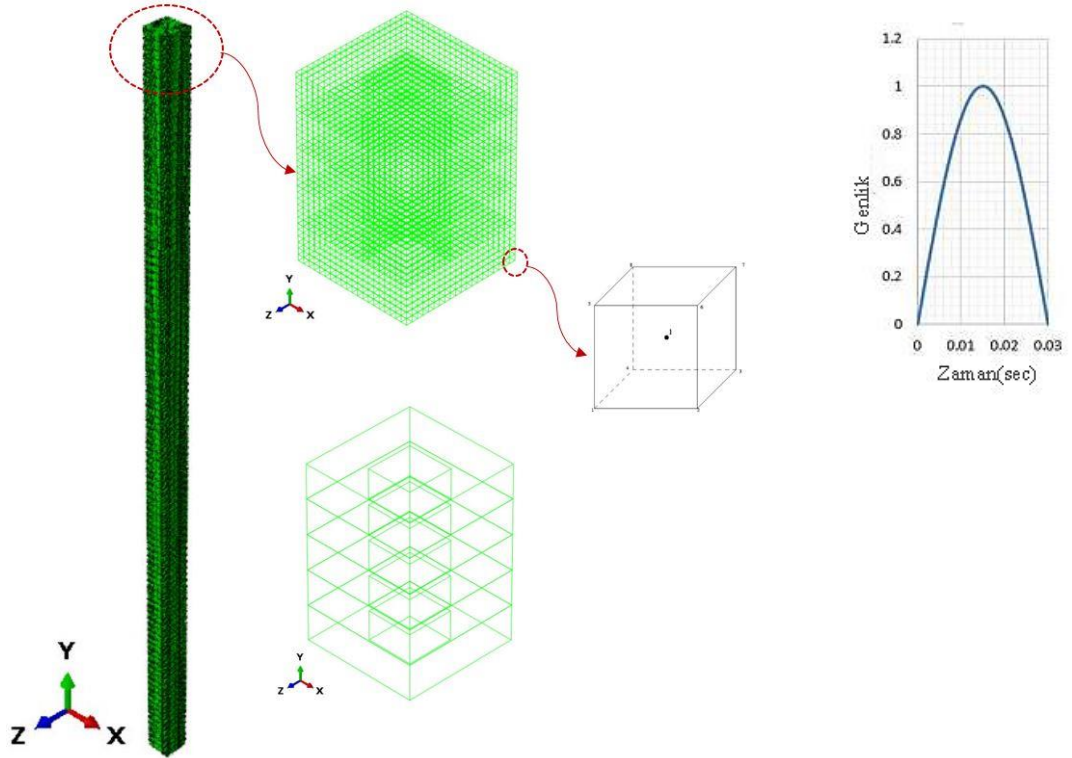
modeldeki süreksizlik, 4 m x4 m iç delikli 10 m x10 m kesitli içi boş bir çekirdek perde duvar geliştirilerek temsil edilmektedir. Boşluklu çekirdek, her kat seviyesinde, 3m de bir aralıkla 0.25 m kalınlıkta bir levha ile sınırlandırılmıştır. Nispeten daha ağır döşeme eşdeğeri birim kütle için, 20 m x20 m bir kat planı alanının iletilen gerçek kütlelerini telafi ettiği kabul edilmektedir. Model, 35200 katı elemandan ve 57800 düğüm noktasından oluşmaktadır. Model, 8 düğümlü (bir entegrasyon noktası) katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Yapı betonu C50 sınıfı betondur. Malzemenin elastisite modülü  $E=37000$  MPa, kayma modülü  $G = 15416.67$  MPa ve kütle yoğunluğu  $\rho= 2500$  kg /m<sup>3</sup> şeklindedir. Her iki model de tabana ankastredir. Sürekli ve ayrık modellerin üç boyutlu görünümü ve ilk 3 mod şekilleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 de gösterilmektedir. Ayrık modelin kesiti Şekil 3.5 'de sunulmaktadır. Her iki model de 0.03 saniyelik bir süre ve bir birim genliğe sahip yarım sinüs dalgası etkisine bırakıldı. Dalga atımı enine ve boyuna basınç dalgası olarak uygulanmıştır (Şekil 3.5).



**Şekil 3.3.** Sayısal sürekli model, 3B görünüm ve ilk üç mod şekli



Şekil 3.4. Sayısal ayırık model, 3 boyutlu görünüm ve ilk üç mod şekli.



Şekil 3.5. Dalga şeklinde uygulanan yarı sinüzoidal atım ve ayırık sayısal modelin kesiti.

Geliştirilen modeller, açık zaman alanı analizinin gerçekleştirildiği ABAQUS SIMULA, V2017 yazılımları kullanılarak analiz edilmektedir. Modeller, enine ve boyuna atım dalgalarına maruz kalmaktadır. Dalga yayılmasının temel özellikleri (1) tepki süresi gecikmesi, (2) iletilen dalgalarda çoğaltma, (3) dalgaların negatif polarizasyon ile yansması, (4) pozitif polarizasyon ile dalgaların iletimi, (5) dalgaların tepe noktasının kayması, (6) incelenen modellerin serbest mesnet ucunda iletilen ve yansıyan dalgaların büyüklüğü parametreleri bakımından irdelenmektedir. Atım şeklindeki dalganın yatay ve düşey yerdeğiştirme zaman geçmişleri incelenmektedir. Yükseklik boyunca hareket eden dalgaların enine ve boyuna ilerlemesi ile zaman gecikmesinin belirlenmesi üzerinde durulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki teorik çalışmalardan ve analitik modellerden elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir.

### **3.2.1. Doğrusal olmayan yapısal analiz paketleri - açık çözüm tekniği (explicit)**

#### ***Katı eleman boyunca dalga yayılımı***

Dalğanın katı bir cisim içinde üç doğrultuda yayıldığı bilinmektedir. Bir katı cisim ankastre mesnetli tarafından olduğu gibi tek tarafından bir dalgaya maruz kaldığında, dalga en yakın yüzeye gelene kadar bu katı gövde içinde enine ve boyuna doğrultularda yayılmaktadır. Daha sonra dalga kısmen yansmakta, kısmen de ilerlemektedir. Zaman ölçeğinde, belirli konumdaki bir parçacığın, ilk iletilen dalgaların ve yansıyan dalgalar nedeniyle oluşan yeni dalgaların karmaşık bir örtüşmesini deneyimlediği fark edilmiştir. Dalğanın yayılımı, en yakın ara yüzeye olan iletim süresine, iki yüzey arasındaki mesafeye, hız, yükseklik ve periyot gibi dalga özelliklerine bağlıdır. Yüksek yapılar söz konusu olduğunda, dalğanın tek yönde hareket ettiği kabul edilerek tek boyutlu dalga olarak dikkate alınabilir. Dalga yayılım analizi yapmak için, dalga yayılımının komşu elemanlar arasında herhangi bir atlama olmadan aktarıldığı ortaya konmalıdır. Tüm yapının, bağlantıların veya eklemlerin bir dalga kılavuzu rolünü oynadığı bağlantılı öğeler zincirinde olduğu kabul edilmektedir. Bina türü yapılarda dalga, düşey elemanlar (kolonlar ve perde duvarlar) boyunca yayılmakta, giriş ve döşeme gibi yatay elemanlara gelince kısmen yansmakta kısmen de ilerlemektedir.



Dalga yayılma hususu için açık entegrasyon yöntemleri tercih edilmektedir. ABAQUS/Explicit, merkezi fark yöntemini kullanarak açık dinamik analiz gerçekleştirmektedir. Açık yöntemlerde, sistemin denklemleri ayrı olarak eleman eleman çözülmektedir. Kütle matrisi köşegen bir matris olduğundan, denklemler bağımsız olmayacaktır. Dolayısıyla, rijitlik matrisi oluşturmaya gerek yoktur ve denklemler eşzamanlı olarak çözülmemektedir.

Buradaki önemli hususlardan biri, hızlı ve doğru çözüme imkan tanıyacak uygun bir eleman seçmektir. Hesaplama modelindeki sonlu elemanın tepki davranışını temsil etmek için, tüm eleman türlerine ayırıştırma sonrası safhasında bir polinom fonksiyonu atanmaktadır. Şekil fonksiyonun derecesi, bir elemanın beklenen davranışıyla eşleşecek şekilde temsil edilen tepkinin doğruluğunu etkileyecektir. Daha yüksek dereceden fonksiyona sahip elemanlar tavsiye edilmekle birlikte, birinci dereceden fonksiyona sahip elemanlara kıyasla çok daha yüksek frekanslar elde edilmektedir. [M] ve [C] matrisleri köşegen olduğunda ve bu birinci dereceden katı elemanlarda olduğu zaman, hareket denklemleri birleştirilmez ve bu denklemleri aynı anda çözmeye gerek yoktur. Birinci dereceden elemanlar için şekil fonksiyonu doğrusaldır. Geliştirilmiş kum saati kontrolü (hour glassing control) ile birinci dereceden elemanın uygulanmasının ve azaltılmış entegrasyon rijitlik matrisinin özelliğinin, kapalı dinamik analizde kullanılan uyumsuz katı elemanlara kıyasla eğilme ve basınç davranışında kabul edilebilir sonuçlar verdiği bildirilmiştir (Manual 2020) .

Sonlu eleman ağında, sıfır enerji modu veya kum saati modu olarak adlandırılan yanlış bir deformasyon modu oluşabilir. Bu durum merkezi entegrasyon noktasındaki sıfır şekildeğiştirme değerlerinin bir sonucudur. Entegrasyon için sadece bir noktaya sahip oldukları için birinci dereceden indirgenmiş entegrasyon elemanlarında tespit edilebilir. Sınır koşullarının bir dizi bitişik düğüm üzerinde dağılımı, kum saati etkisini en aza indirebilir. Ayrıca çok ince bir ağ sistemi önerilir. Bu çalışmada seçilen eleman ağı, enine etki durumunda geliştirilmiş kum saati kontrolü özelliğine ve boyuna etki için gevşeme rijitliği kum saati kontrolü özelliğine sahiptir.

Rijit bir elemanın kenarları eğilme altında eğri şeklinde deforme olamaz. Bunun sonucu olarak, indirgenmiş tepki, eğilme davranışı ile değil, kesme davranışı tarafından yönetilir. Bu nedenle, yer değiştirme, gerilme ve frekans gibi bulgular yanlış ve yanıltıcı görünmektedir. Bu çalışma için, geliştirilen modellerin eğilme davranışını iyileştirmek için indirgenmiş entegrasyon elemanı seçilmektedir. Tam veya azaltılmış entegrasyon terimi yalnızca rijitlik matrisi ile ilgilidir. Kütle ve yük matrislerinde tam entegrasyon olmaktadır. Rijitlik matrisini oluşturmak için düşük dereceli bir entegrasyon kullandığından, kayma veya hacimsel kilitleme ile sonuçlanmaz ve aşırı deformasyon koşullarında sağlamdır. Öte yandan, azaltılmış entegrasyonun kullanılması, özellikle üç boyutlu modeller için işlem süresini azaltabilir. Kum saati kontrolü altında elastik malzemeye sahip azaltılmış entegrasyon elemanlarının yer değiştirmesi, uyumsuz modal elemanları yer değiştirmesi (Manual 2020) ile tutarlıdır. Uyumsuz modal elemanlar için, elemanların eğilme davranışını geliştirmek için elemanlara yerel olarak bir dizi uyumsuz mod eklenmektedir. Uyumsuz modal eleman çok iyi eğilme davranışı göstermesine rağmen, indirgenmiş entegrasyon elemanına kıyasla zahmetlidir. Daha sonra, belirli koşullar altında uyumlu bir eğilme davranışı sağlama avantajına sahiptir.

### **3.3. Yüksek Binaların Açık Dinamik Tepki Analizi için Rayleigh Sönümlemesinin Sayısal Tartışması**

Bu kısımda Rayleigh sönüm modelinin yüksek binaların sismik etki altındaki elastik davranışı için geçerliği açık dinamik analiz gerçekleştirilerek değerlendirilmektedir. Bina yüksekliği boyunca ilerleyen deformasyon dalgalarının çoklu iletim ve yansımasının gerçekleştiği binalarda dinamik davranışta dalga yayılma analizi için açık çözüm tercih edilmektedir. Burada yüksek binaların sismik etkiler altındaki dinamik davranışını açık çözüm dikkate alarak değerlendirmek için Rayleigh sönümleme modelinin güvenilirliğini sayısal olarak araştırmaktadır. Bunun yanında binanın yüksek modlarında Rayleigh sönüm modelinin etkisi de irdelenmektedir.

Kullanılan sayısal modellemenin esnekliği, herhangi bir sınır koşulu ile herhangi bir yük durumu altında bina davranışlarının analizine imkân tanımaktadır. İleri yapısal analiz programları, ısı iletimi, patlama ve gerilme değişimi gibi alanlarda dalga yayılmasını

modelleyerek dinamik analizi açık çözüm ile gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımı, çekirdek perde duvar ve çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 46 katlı betonarme bir binanın dinamik davranışının değerlendirilmesi için Rayleigh sönümlenme modelinin geçerliliği açık (EXP) ve kapalı (IMP) çözüm tekniği kullanılarak sayısal olarak incelenmektedir. Dikkate alınan yüksek bina enine doğrultuda ve yüksekliği doğrultusunda dalga yayılmasına maruz bırakılmaktadır. Seçilen binanın 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarında da eksenel kuvvet (N), kesme kuvveti (V) ve eğilme momenti (M) için Fourier Genlik Spektrumları (FAS) tepki süresi geçmişleriyle birlikte değerlendirilmektedir. Açık çözüm tekniği dikkate alınarak belirlenen eğilme momenti  $M_{EXP}$ , kesme kuvveti  $V_{EXP}$ , eksenel kuvvet  $N_{EXP}$ , görelî kat ötelenmesi  $ID_{EXP}$  sembolleri ile ifade edilmektedir. Aynı bağlamda kapalı çözüm tekniği kullanarak belirlenen, eğilme momenti  $M_{IMP}$ , kesme kuvveti  $V_{IMP}$ , kapalı çözüm dikkate alan eksenel kuvvet  $N_{IMP}$  ve görelî kat ötelenmesi  $ID_{IMP}$  sembolleri ile ifade edilmektedir. Sayısal zaman entegrasyon yönteminin açık çözüm tekniği ile ilişkili gürültüyü ortadan kaldırmak için dördüncü derece “Buterworth” filtresi 30Hz’e eşit olan kesme frekansı ile uygulanmıştır. Sönümlenme, klasik bir Rayleigh sönümü olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma için zemin-yapı etkileşimi ve temel dönme etkisi dikkate alınmamıştır. Burada, seçilen yüksek binanın yönetmelik koşullarını sağlayıp sağlamadığının değerlendirilmediğini sadece incelenen konuyu modellemek bağlamında kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

### **3.3.1. Kullanılan model**

Bu çalışmada dikkate alınan çekirdek perde duvarlı ve çerçevesiz taşıyıcı sisteme sahip 46 katlı binanın kat planı Şekil 3.6 da göstermektedir. Çekirdek perde duvar bağlantı kirişleriyle bağlanan L şeklinde duvarlardan oluşmaktadır. Dikkate alınan beton için tabandan yirminci kata kadar olan 600 mm kalınlığındaki çekirdek perde duvarda beton sınıfı olarak C40/50, yirminci katın üzerindeki 450 mm kalınlığındaki perde duvarlarda ise C35/45 olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve kirişlerinin kesit boyutları 750 mm × 900 mm olup bu elemanlardaki beton sınıfı C35/45'dir. Katların yüksekliği, kolon boyutları ve malzeme özellikleri Çizelge 3.3 de verilmektedir. Yüksek bina sonlu elemanlar modeli, çekirdek perde duvar 63074 düğümlü (29390) C3D8R elemanında ve çerçeve

sistemi 49053 düğümlü (24704) C3D8R elemanlarından oluşmaktadır. Seçilen eleman 8 düğüm noktalı, birinci dereceden rijit eleman (doğrusal şekil fonksiyonuna sahip), sürekli gerilme dağılımına imkan tanıyan, cam kırılması şeklindeki sahte mod için kontrollü, entegrasyon noktası sayısı bir olan indirgenmiş entegrasyon uygulanabilen bir üç boyutlu sonlu elemandır.

Modelde sonlu elemanlar ağı altıgen şekilde oluşturulmuştur. Bina tabanının ankastre mesnetli olduğu kabul edilmiştir. Sönüm için %5 viskoz sönümlemeye eşdeğer olan klasik Rayleigh sönümü kullanılmıştır.

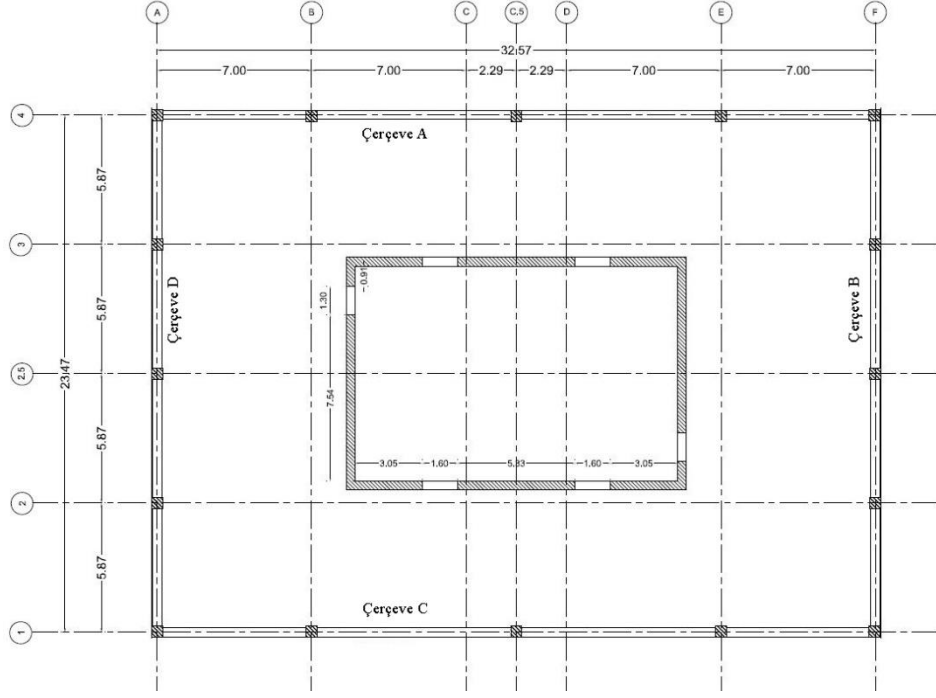
Geliştirilmiş cam kırılması şeklindeki sahte mod kontrolü (yatay etki için) ile birlikte azaltılmış entegrasyon rijitliği matris özelliğinin kullanılması, dalga yayılması ihmal edilerek gerçekleştirilen klasik dinamik analizde kullanılan uyumsuz katı elemanlara kıyasla eğilme ve basınç tepkileri için kabul edilebilir sonuçlar vermektedir (Manual 2020).

Dalga yayılım analizi göz önüne alındığında, birinci dereceden rijit eleman (doğrusal şekil fonksiyonuna sahip) için kütle [m] ve sönüm [c] matrislerinin köşegen olduğu, dolayısıyla hareket denklemlerinin birleştirilmemiş olduğu belirtilebilir. Eğilme davranışını geliştirmek için, azaltılmış entegrasyon özelliği seçilmekte ve rijitlik matrisini oluşturmak için düşük dereceli bir entegrasyon ile kayma ve hacimsel kilitleme önlenmektedir. Çok sayıda elemana sahip modeller için, azaltılmış entegrasyon elemanlarının çalışma süresini azaltma avantajına sahip olduğuna da belirtmek uygun olmaktadır. Rayleigh sönümünde çekirdek perde duvar ve çerçeve için sırasıyla kütle katsayıları  $\alpha$  lar 0.217 ve 0.239; rijitlik katsayıları  $\beta$  lar ise 0.0066 ve 0.0055 olarak kullanılmışlardır. Analiz edilen binanın ilk 20 mod şekline ilişkin titreşim özellikleri Çizelge 3.4 de sunulmaktadır.

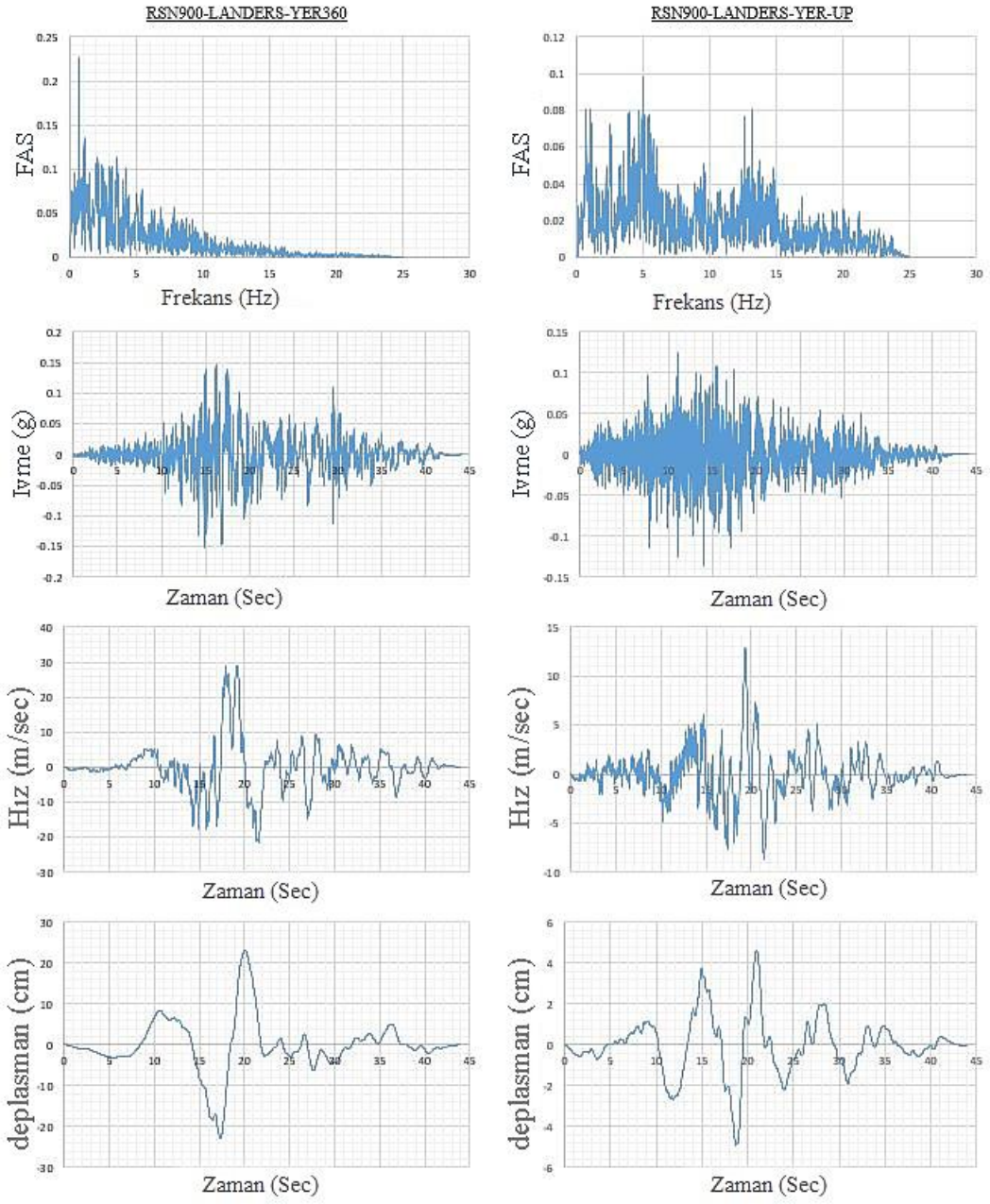
Bu çalışma için, kararlı zaman artışı, çekirdek perde duvar için 1.86495e-05 ve çerçeve sistemi için 2.17443e-05 olarak belirlenmiştir.

Seçilen bina modeli 06.28.1992 Yermo İtfaiye İstasyonunda Landers depremi için kaydedilen yatay sismik dalga (RSN900-LANDERS-YER360); ve düşey sismik dalga (RSN900-LANDERS-YER-UP) etkisine maruz bırakılmıştır. Söz konusu kayıtlar PEER-

NGA güçlü hareket veri tabanından indirilmiştir (PEERReport2013/24 2013). Şekil 3.7 hem yatay hem de düşey bileşenler için zaman alanı kayıtlarını ve genlik Fourier spektrumlarını göstermektedir.



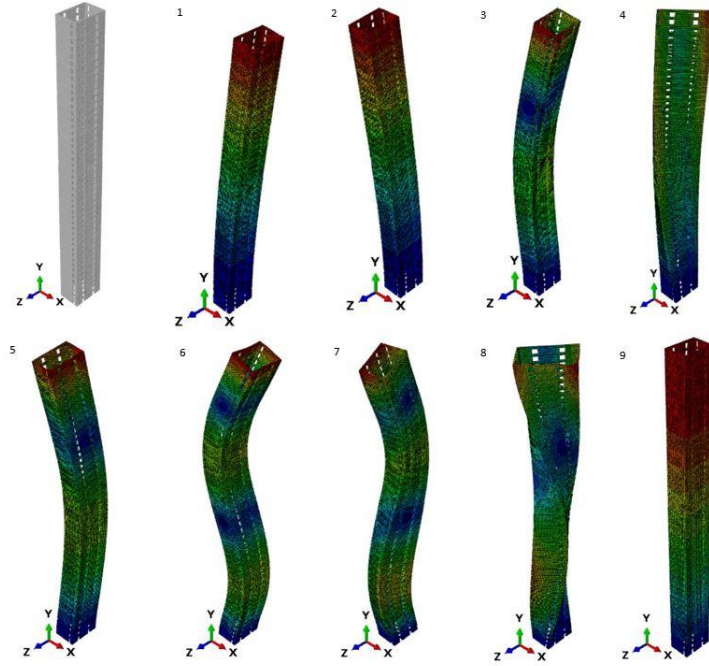
Şekil 3.6. 46 katlı yüksek binanın tipik plan görünümü.



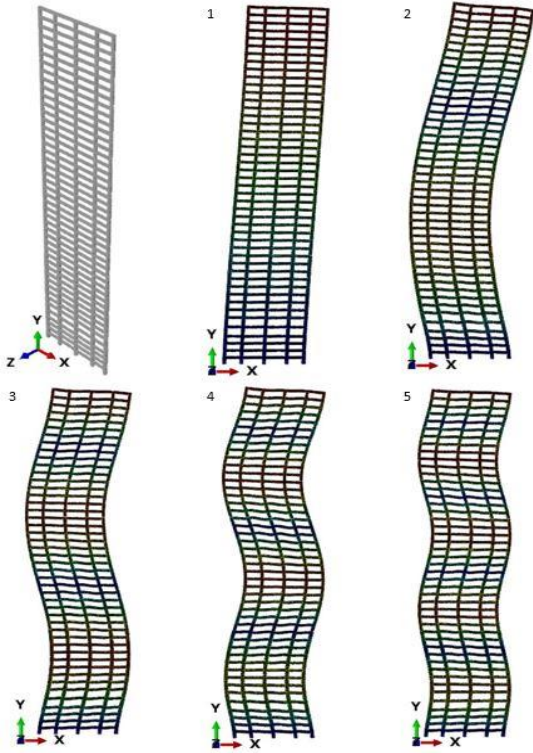
**Şekil 3.7.** 28.06.1992 tarihli Landers depremi için Yermo İtfaiye İstasyonu'ndan alınan yatay ve düşey sismik dalgaların uyarımı.

**Çizelge 3.3.** Çerçeve sistem için kat yükseklikleri ve malzeme özellikleri.

Kat No.	Yükseklik (m)	Kolon kesiti(m <sup>2</sup> )	Beton sınıfı
1-4	3.2	1.2x1.2	C70/85
5-6	4.2	1.2x1.2	C55/67
7-18	3.2	1.2x1.2	C55/67
19-22	3.2	1.0x1.0	C40/50
23-32	3.2	1.0x1.0	C35/45
33-46	3.2	0.9x0.9	C35/45



**Şekil 3.8.** Perde duvar, 3B görünüm ve ilk 9 mod şekli.



Şekil 3.9. Çerçeve sistem, 2 boyutlu görünüm ve ilk 5 mod şekli.



**Çizelge 3.4.** Perde duvar ve çerçeve sistem için 20 mod şeklinin frekansı ve titreşim periyodu.

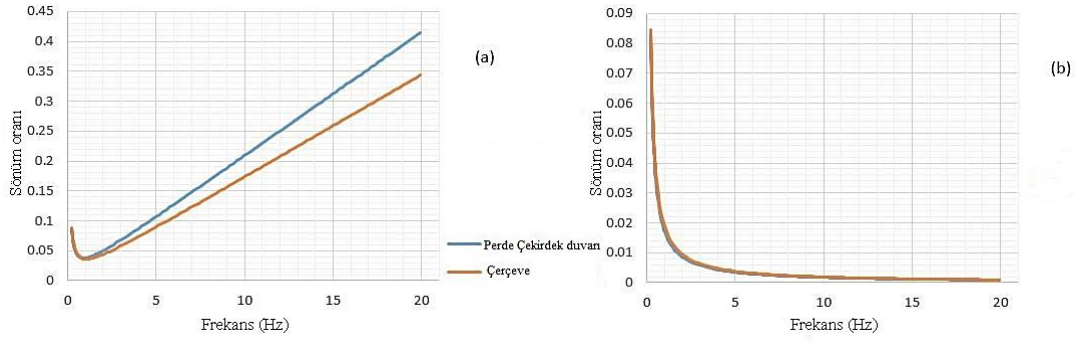
Mod No.	Çekirdek duvar		Çerçeve	
	Frekans (Hz)	Periyot (Sec)	Frekans (Hz)	Periyot (Sec)
1	0.416	2.404	0.450	2.222
2	0.565	1.770	1.347	0.742
3	1.996	0.501	2.464	0.406
4	2.091	0.478	3.627	0.276
5	2.468	0.405	4.633	0.216
6	4.715	0.212	4.795	0.209
7	5.445	0.184	5.922	0.169
8	5.790	0.173	6.666	0.150
9	6.290	0.159	7.236	0.138
10	7.734	0.129	8.458	0.118
11	8.591	0.116	9.716	0.103
12	10.407	0.096	10.668	0.094
13	11.275	0.089	10.949	0.091
14	12.372	0.081	12.162	0.082
15	14.034	0.071	12.324	0.081
16	14.609	0.068	13.724	0.073
17	15.913	0.063	13.968	0.072
18	16.431	0.061	15.180	0.066
19	17.851	0.056	16.426	0.061
20	18.563	0.054	16.683	0.060

Açık (explicit) çözüm tekniğinde kararlılığı yöneten ağ boyutu için, en küçük elemanın maksimum frekansının ve zaman artışının kararlı zamana oranı önemli olmaktadır.

### 3.3.2. Rayleigh sönümü

Dalga yayılım analizi için açık (explicit) çözüm tekniğini dikkate almak, hareket denklemlerinin birleştirilmemiş olduğu anlamına gelmektedir. Burada köşegen bir kütle matrisi durumunda küçük bir sorun olarak düşünülebilecek kütle matrisinin ters çevrilmesidir. Açık çözüm tekniği ile ilgili olarak, rijitlik orantılı sönümlemenin etkisine bağlı olarak zaman artışının stabilite sınırı doğal olarak azalmaktadır. Bu nedenle göz ardı edilmesi tavsiye edilmektedir (Manual 2020). Şekil 3.10-(a) rijitlik orantılı sönümlemenin yüksek frekans değerlerinin daha yüksek modlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Literatür çalışmaları genel olarak rijitlik orantılı sönümlemenin etkisini toplam dinamik tepki üzerindeki ihmal edilebilir etkisi nedeniyle dikkate almasa da; bu kabulün, yüksek modların toplam dinamik tepkisinde önemli bir katkısı olduğu, geniş frekans aralıklarına sahip yüksek binalar için geçersiz olması beklenmektedir.

Çekirdek perde duvar-çerçeve sisteminde dalga yayılma analizini gerçekleştirmek için, açık çözüm tekniği (temsili olarak merkezi fark zaman entegrasyon yöntemi) uygulanmaktadır. Kritik sönümlemede, rijitlik oranı faktörü ihmal edilirken, kütle oranı faktörü dikkate alınmaktadır. Sonuç olarak, yüksek frekans değerlerine sahip daha yüksek modlar üzerindeki sönüm etkisi, Şekil 3.10-(b) 'de gösterildiği gibi yaklaşık olarak sıfıra eşit olmaktadır. Bu nedenle, aksenal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti gibi dinamik tepkilerin, Rayleigh sönümünün tam matrisli klasik analiz sonuçlarına göre bir dereceye kadar büyütülmesi beklenmektedir. Şekil 3.10-(b) 'de gösterildiği gibi, dalga yayılması dikkate alındığında, sönümleme etkisi kütle orantılı katkı ile sınırlıdır. Bu nedenle çekirdek perde duvar ve çerçeve sistemi başlangıç Mod frekansı kritik bir sönüm değeri ile sönümlenmekte, daha sonra sönümlemenin etkisi daha yüksek frekans modları için yaklaşık olarak sıfıra düşmektedir.



**Şekil 3.10.** Rayleigh sönümü (a) dalga yayılımı ihmal edilerek ve (b) dalga yayılımı dikkate alarak.

### 3.4. Yüksek Binaların Dinamik Tepki Analizi için Dalga Yayılımı Yaklaşımı-Sayısal Tartışma

Bu çalışmada, yüksek binaların dinamik tepkisi üzerinde sismik dalga yayılımının etkisi sayısal olarak incelenmektedir. Sismik dalga yayılmasının etkisini ortaya koymak amacıyla çekirdek perde duvarlı-çerçeve sisteme sahip yüksek bir binanın dinamik tepkileri, dalga yayılımı hem ihmal edilerek hem de dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmektedir. Bina taşıyıcı sisteminin elemanlarında meydana gelen eğilme momenti, kesme kuvveti ve aksel kuvvet değerleri belirlenmektedir. Dinamik davranış için Fourier genlik tepki spektrumları farklı katlarda belirlenerek irdelenmektedir. Toplam 46 katlı olan betonarme çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem yatay sismik dalgaya ve sabit tabanda yüksekliği boyunca dalgaya maruz kalmaktadır.

Dikkate alınan yüksek binanın dinamik analizi için öncelikle bina sayısal olarak modellenmiştir. Böylece esas sayısal modelin farklı sınır ve yük durumlarında da geçerli olması sağlanmıştır. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımı kullanılarak, toplam 46 katlı çekirdek perde duvar ve çerçeve sistemden oluşan binanın dinamik tepkisini incelemek için dalga yayılımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Bina taşıyıcı sistemini oluşturan çekirdek perde duvar ve çerçeve üç deprem setine maruz bırakılmıştır (çizelge 3.5). Sismik dalgalar boyuna doğrultuda sıkıştırma dalgaları, enine doğrultudakiler ise kayma dalgası olarak dikkate alınmıştır. Her deprem için, Fourier Genlik Spektrumları (FAS), yapısal tepki süresi geçmişleriyle birlikte aksel kuvvet (N), kesme kuvveti (V), eğilme

momenti (M) ve görelî kat ötelenmesi (ID) binanın 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katları için değerlendirilmektedir. Nihai eğriler uygulanan 3 deprem seti dikkate alınarak yapısal dinamik tepkilerin ortalama değerine göre çizilmektedir. Sismik dalga yayılmasının belirtilen modellerin dinamik tepkisi üzerindeki net etkisini doğru bir şekilde göstermek için, dinamik tepkiler dalga yayılma dikkate alınarak (CWP) ve dalga yayılması ihmal edilerek (IWP) değerlendirilmektedir. Dalga yayılım analizini gerçekleştirmek için açık çözüm (temsili olarak merkezi fark yöntemi) kullanılmıştır. Dinamik analizi dalga yayılımını ihmal ederek gerçekleştirmek için kapalı (implicit) çözüm tekniği kullanılmıştır.

Dalga yayılımı dikkate alınarak gerçekleştirilen analizde eğilme momenti  $M_{CWP}$ , kesme kuvveti  $V_{CWP}$ , aksenal kuvvet  $N_{CWP}$  ve görelî kat ötelenmesi  $ID_{CWP}$  sembolleri ile gösterilmektedir. Aynı bağlamda, kapalı çözüm tekniği dikkate alınarak belirlenen eğilme momenti  $M_{IWP}$ , kesme kuvveti  $V_{IWP}$ , aksenal kuvvet  $N_{IWP}$ , ve görelî kat ötelenmesi  $ID_{IWP}$  sembolleri ile ifade edilmektedir. Dördüncü dereceden sınır kesim frekanslı (30Hz) “Butter-worth” filtresi, sayısal zaman entegrasyon yönteminin açık çözüm tekniği ile ilişkili gürültüyü ortadan kaldırmak için uygulanmıştır. Sönüm klasik bir Rayleigh sönümü olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma için zemin-yapı etkileşimi ve temelın dönmesi dikkate alınmamıştır. Burada tekrar seçilen yüksek binanın yönetmeliklere uygunluğunun değerlendirilmediğini sadece dalga yayılması açısından irdelendiğini belirtmekte yarar vardır. Matematiksel model yönünden ziyade olayın fiziksel yönüne vurgu yapılarak yüksek binaların yapısal tepkisine ilişkin dalga yayılım olgusunun modelleme süreci üzerinde durulmaktadır.

**Çizelge 3.5.** Dinamik analizde kullanılan yer hareketleri.

Set No.	Deprem	$M_w$	İstasyonu	Joyner-Boore Dist. (km)
1	Landers	7.28	Yermo Fire Station	23.62
2	Loma Prieta	6.93	Saratoga - Aloha Ave	7.58
3	Northridge	6.69	Sylmar - Olive View Med FF	1.74

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

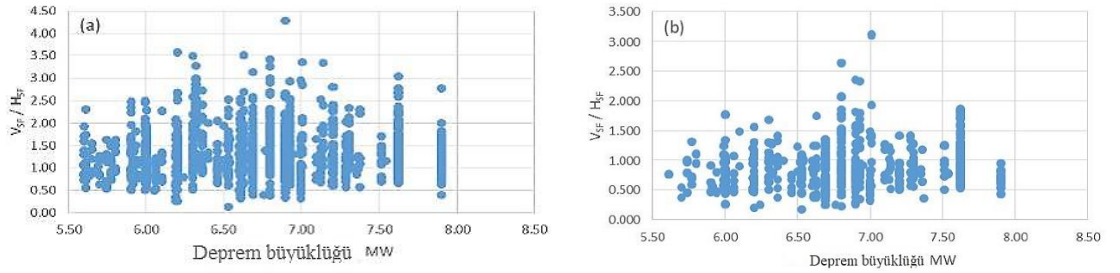
### 4.1. Sismik Yer Hareketinin Düşey Bileşenin Ölçeklendirilmesi

#### 4.1.1. Deprem büyüklüğü ve $V_{SF}/H_{SF}$ oranı

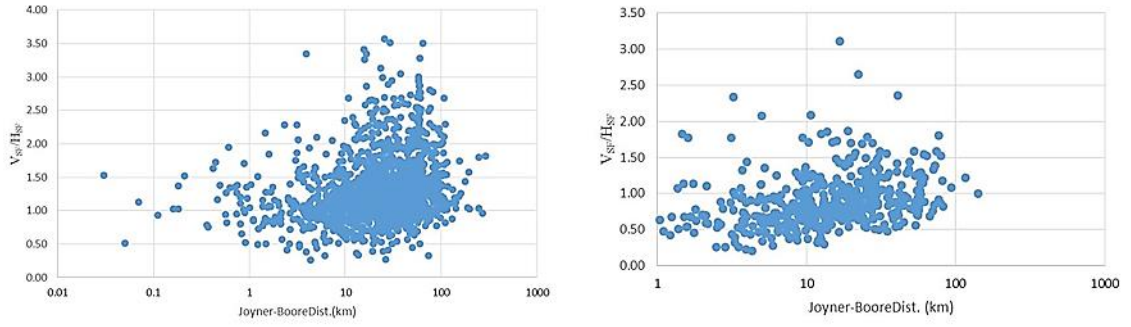
Deprem büyüklüğünün ( $M_w$ ) düşey ölçeklendirme katsayısının yatay ölçeklendirme katsayısına oranı ( $V_{SF}/H_{SF}$ ) üzerinde ASCE 7-16 ve EC8 tepki spektrumları için baskın bir etkiye sahip olmadığı (Şekil 4.1) de göstermektedir.

#### 4.1.2. Joyner-Boore mesafesi ve $V_{SF}/H_{SF}$ oranı

Bu çalışmada, "Joyner-Boore" mesafesi  $R_{JB}$  kaynak mesafesine en yakın olan bölgeyi temsil etmektedir.  $R_{JB}$ , kayıt alanından yüzeydeki kırılmanın düşey izdüşümüne en kısa yatay mesafeyi ifade etmektedir (PEER 2013). Şekil 4.2, geniş bir  $R_{JB}$  mesafeleri aralığında  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının değerinde kademeli bir artışı göstermektedir. Bu çalışmada,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı tüm  $R_{JB}$  mesafeleri aralığında değerlendirilmektedir. Uzak alan ve yakın alan yer hareketi özellikleri arasındaki farklar mevcut çalışma için dikkate alınmamıştır.



**Şekil 4.1.**  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için  $M_w$ . (a)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  ile ASCE7-16 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme. (b) EC8 tepki spektrumlarına göre ölçeklendirme.



**Şekil 4.2.**  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için  $R_{JB}$  (km). (a) ASCE7-16 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için. (b) EC8 tepki spektrumuna göre ölçeklendirme.

### 4.1.3. Farklı zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı

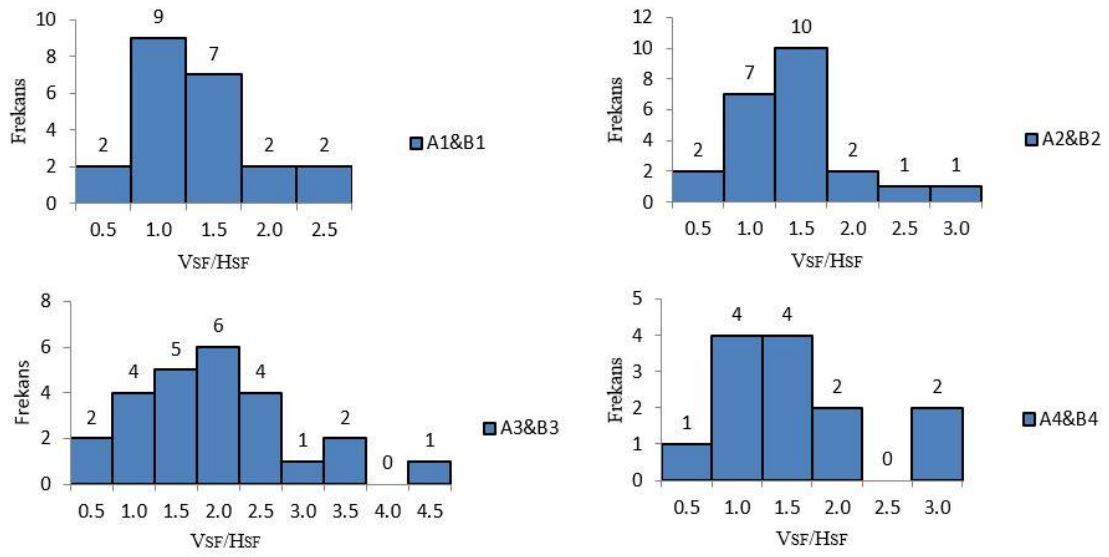
#### *A & B zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı*

A zemin sınıfı için dikkate alınan kayıt sayısı 4'tür. Bunlar B zemin sınıfı için dikkate alınan kayıtlarla aynı kategoride değerlendirilmektedir.  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının frekansı A & B zemin sınıfları için Şekil 4.3 'de gösterilmektedir. A1 & B1, A2 & B2, A3 & B3 ve A4 & B4 zemin sınıfları için frekanslar sırasıyla %41, %30, %16 ve %31 şeklindedir. Bu arada, A1 & B1, A2 & B2, A3 & B3 ve A4 & B4 zemin sınıfları için [1.5 – 2saniye] aralığıyla ilişkili  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için frekanslar sırasıyla 41 %, 52%, 44% ve 46% olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.1- Çizelge 4.4  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için yüksek standart sapmayı göstermektedir. Bu nedenle,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı, A & B zemin sınıfları için ortalama değerden uzağa dağılmakta ve bu da söz konusu oran için uygun bir potansiyel yaklaşımı tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır.

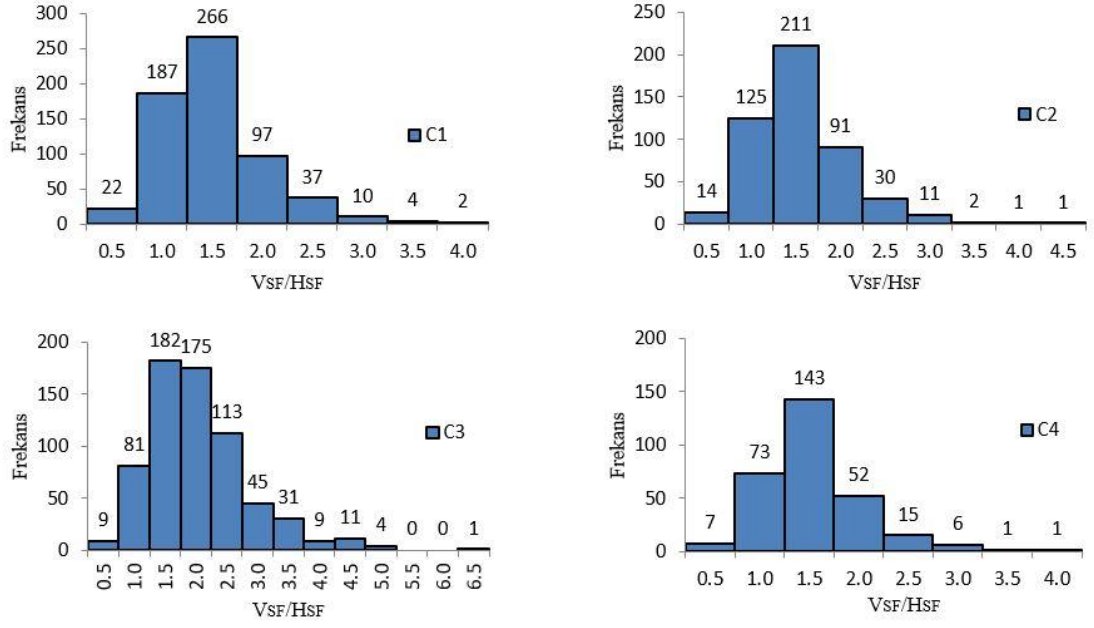
#### *C & D zemin sınıfları için $V_{SF}/H_{SF}$ oranı*

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, C ve D zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının frekanslarını göstermektedir. Frekanslar C1, C2, C3 ve C4 zemin sınıfları için %30, %26, %12 ve %24 şeklindedir. Bu arada C1, C2, C3 ve C4 zemin sınıfları için, [1.5- 2] aralığıyla ilişkili  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için frekanslar %58, %62, %54 ve %65 şeklindedir.  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı 1'e eşittir, D1, D2, D3 ve D4. zemin sınıfları için frekanslar %24, %24, %21 ve %48. Bu arada, D1, D2, D3 ve D4 zemin sınıfları için [1.5- 2] aralığıyla ilişkili  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için

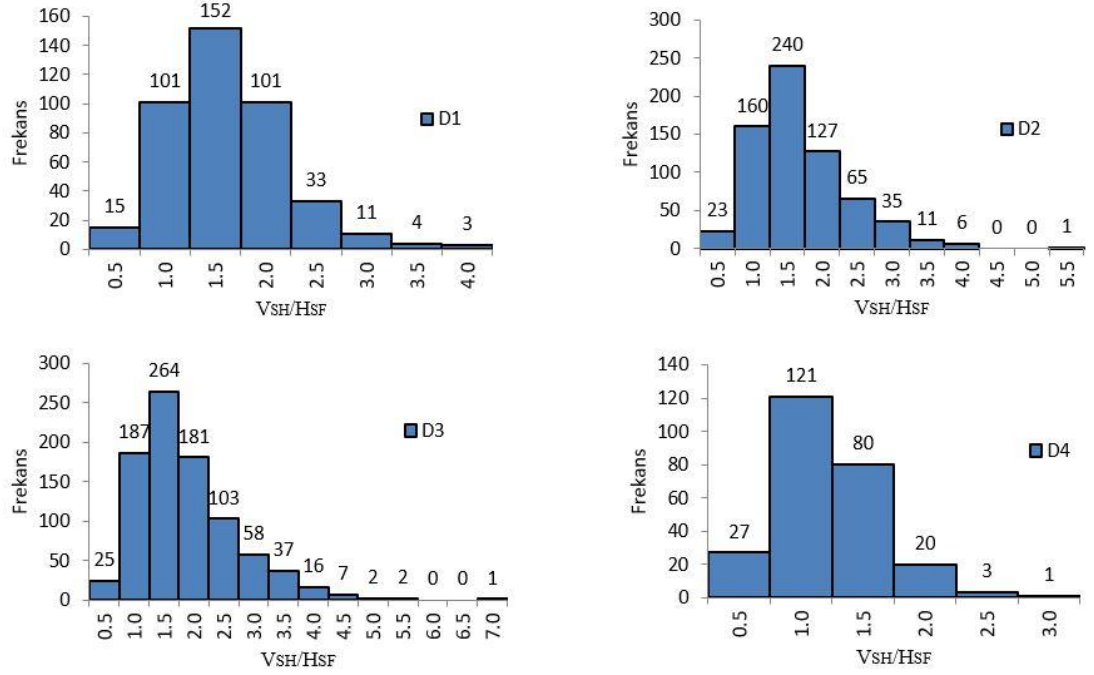
frekanslar %60, %55, %50 ve %40 şeklindedir. Çizelge 4.1- Çizelge 4.4 yüksek standart sapma değerlerini göstermektedir. Bunun sonucunda C ve D zemin sınıfları için,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için güvenilir bir ortalama değer tahmin etmek zorlaşmaktadır. Bu sonuç, A ve B zemin sınıfları için daha önce belirtilen sonuçla aynıdır. İncelenen oran, ASCE7-16 tepki spektrumlarına ölçeklendirme için kullanılanlara kıyasla EC8 tepki spektrumlarına ölçekleme için daha düşük değerler sergilemektedir. Bir diğer önemli bulgu,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının maksimum değerlerinin C ve D zeminlerde kaydedilmesidir. D zemin sınıfı için 6.5'e ve C zemin sınıfı için 6.3'a ulaşırken, A & B zemin sınıfları için 4.3'ye ulaşmaktadır.



**Şekil 4.3.** A & B zemin sınıflarına göre  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının frekansı. A1 & B1,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi A2 & B2,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$  &  $0.35$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. A3 & B3,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.2$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. A4 & B4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.



**Şekil 4.4.** C zemin sınıfına göre  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının frekansı. C1,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.6$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C2,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C3,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.25$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. C4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.



**Şekil 4.5.** D zemin sınıfına göre  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının frekansı. D1,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.7$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. D2,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.



spektrumu ölçeklendirmesi. D3,  $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. D4, EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.

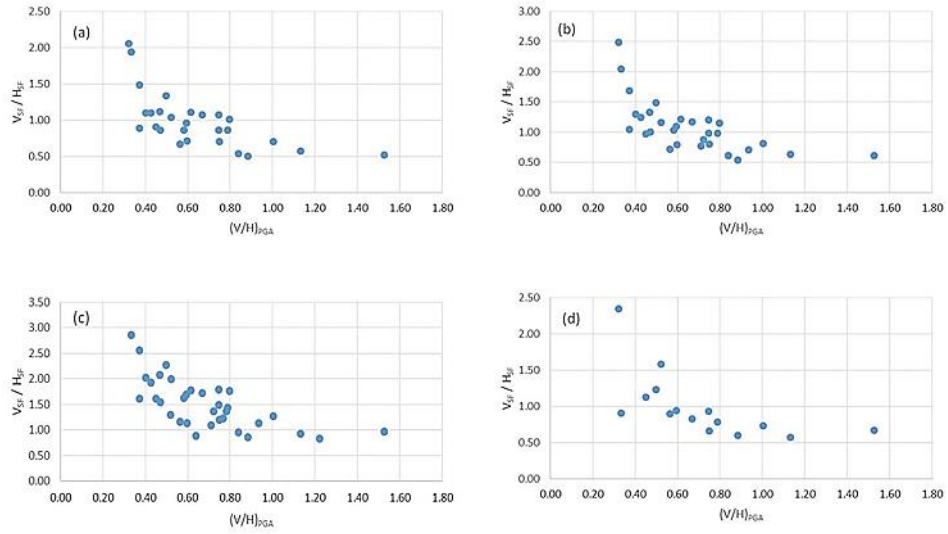
#### 4.1.4. Yoğunluk ölçümü endeksleri

Uzun bir süre, yoğunluk ölçüm endeksleri (IM) aktif bir araştırma alanı olmuştur. Yapısal analiz ve tasarım için yer hareketinin gücünü göstermek ve değerlendirmek için çeşitli IM'ler önerilmiştir. IM'ler, zaman değişimi kayıtlarının frekans tepkisi, süresi ve tepe değerlerine göre kategorize edilmektedir. IM seçimi büyük ölçüde probleme bağlıdır. IM 'ın etkinliği, söz konusu yapısal tepki düzeyiyle tutarlılığına bağlıdır. Bu nedenle, uygun IM endeksi ile yapısal tepki arasında bir tür doğrudan korelasyon olmalıdır. Literatür çalışmaları, tüm yapısal periyotlar veya frekanslar aralığında tolere edilebilecek tek bir IM endeksi olmadığını göstermektedir. Örneğin, PGV tepki spektrumunun hıza duyarlı alanı içindeki yapı temel periyodu için etkilidir (Wei ve ark. 2020). PGA endeksinin, tepki spektrumunun ivmeye duyarlı alanı içerisindeki kısa temel periyottaki rijit binalar için etkili olduğu belirtilmektedir (Wei ve ark. 2019, Zhong ve ark. 2019). PGD endeksi, tepki spektrumunun yer değiştirmeye duyarlı alanı içindeki yapının uzun temel periyodu için etkili görünmektedir. Yer hareketinin düşey bileşeni, kısa periyot aralığında yoğunlaşan yüksek frekans içeriği ile karakterize edilmektedir. Çok katlı yapıların, enine doğrultuya kıyasla boyuna doğrultuda çok daha rijit olduğu iyi bilinmektedir. Böylece düşey titreşim periyodu yatay titreşim periyodundan çok daha kısadır (Assi ve ark. 2017, Noroozinejad ve Tasnimi 2016, Papazoglou ve Elnashai 1996). Sonuç olarak,  $V_{SF}/H_{SF}$  eğilimini  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre değerlendirmek için PGA endeksi seçilmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, bu bölümde yer hareketi özelliklerine göre  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının eğilimini araştırmaya odaklanılmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan tepki analizlerinde geliştirilen basit denklemlerin güvenilirliğini tahmin etmek için kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

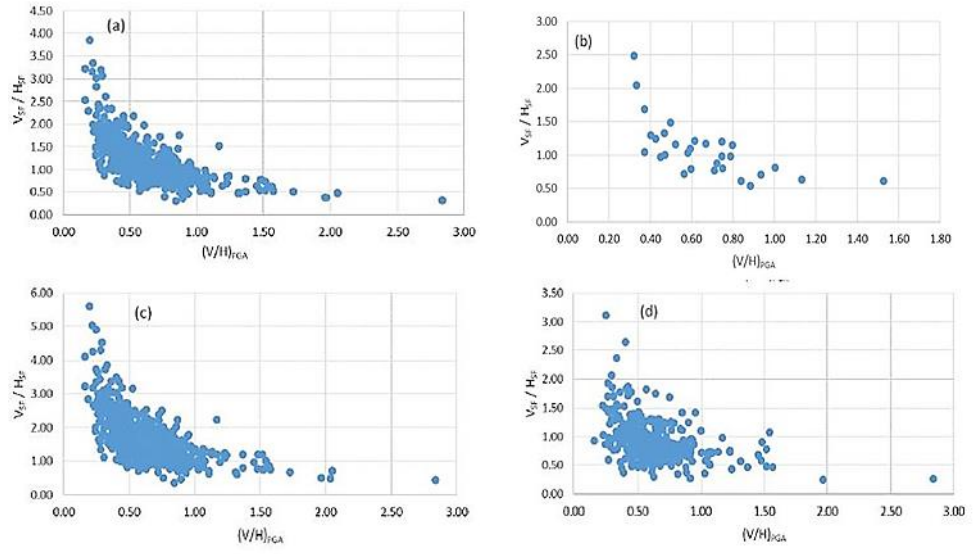
#### $V_{SF}/H_{SF}$ oranına karşı $(V/H)_{PGA}$

$(V/H)_{PGA}$  oranı, sismik yer hareketinin düşey ve yatay bileşenleri arasındaki ilişkiyi araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşey yer hareketinin özelliklerini tanımlamak ve çeşitli deneysel düşey yer hareketi tahmin denklemleri geliştirmek anahtar

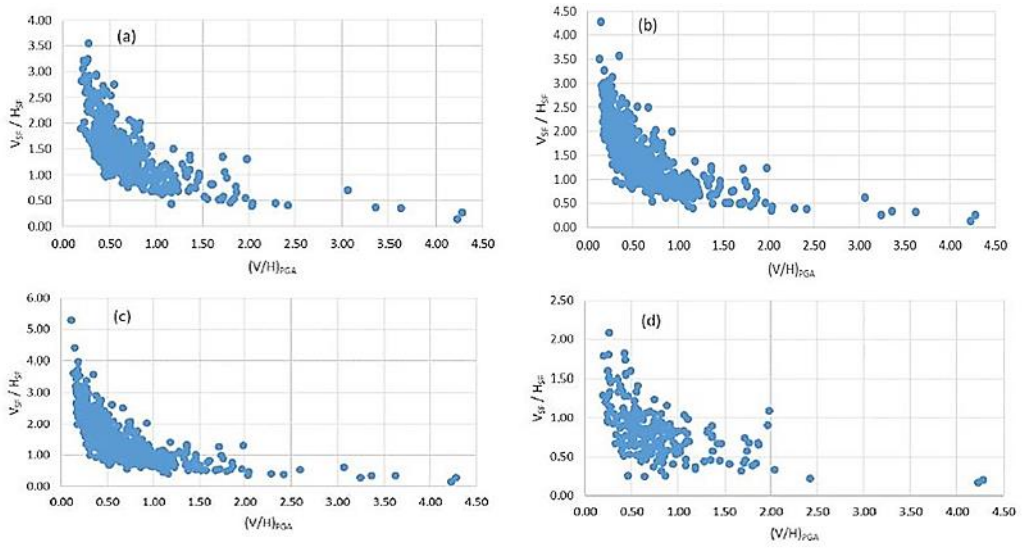
bir parametre olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.6, Şekil 4.7, ve Şekil 4.8  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı arasındaki sağlam ters ilişkiyi ve dikkate alınan tüm zemin sınıfları için  $(V/H)_{PGA}$  oranını açıklığa kavuşturmaktadır. Çalışılan oranlar arasındaki net negatif ilişkiyi ifade etmek için en uygun tahmin modelini değerlendirmek için doğrusal olmayan bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen model, kabul edilebilir bir ortalama değeri korurken gözlenen yüksek standart sapma değerlerini en aza indirmelidir.



**Şekil 4.6.** A & B zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$ 'ye oranı. (a)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi, (b)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$  &  $0.35$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (c)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.2$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.



**Şekil 4.7.** Zemin sınıfları C için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranına karşı  $(V/H)_{PGA}$  oranı. (a)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.6$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (b)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (c)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.25$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.



**Şekil 4.8.** Zemin sınıfları D için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranına karşı  $(V/H)_{PGA}$  oranı. (a)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.7$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (b)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.5$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (c)  $S_{D1}/S_{DS} = 0.4$  için ASCE7-16 tepki spektrumu ölçeklendirmesi. (d) EC8 tepki spektrumu ölçeklendirmesi.

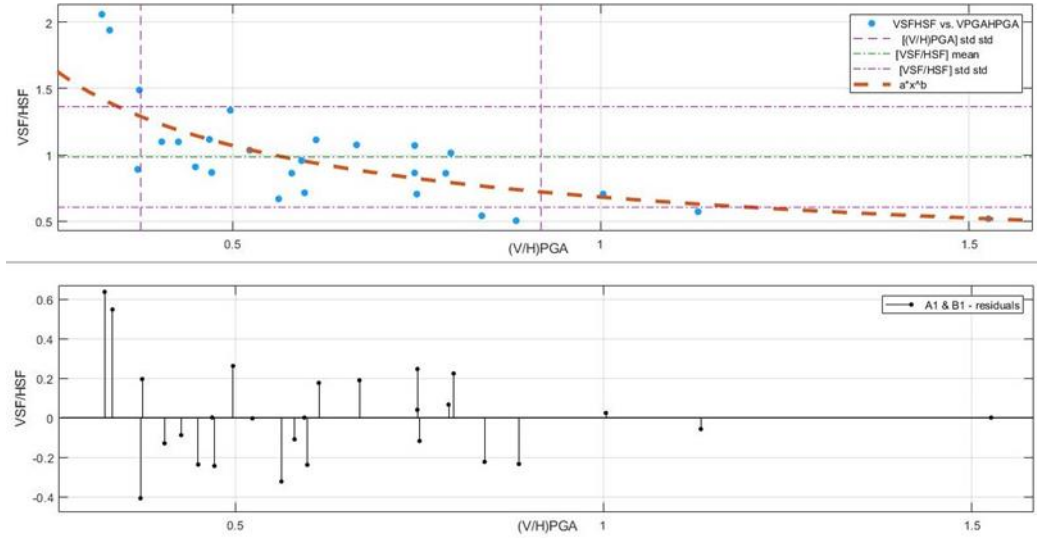
#### 4.1.5. $V_{SF}/H_{SF}$ oranı için $(V/H)_{PGA}$ oranına karşı regresyon analizi

Doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemini kullanarak,  $(V/H)_{PGA}$  oranına karşılık  $V_{SF}/H_{SF}$  oranındaki azalmayı tanımlayacak en uygun fonksiyonu belirlemek için MATLAB yazılımı ile doğrusal olmayan bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Dikkate alınan her zemin sınıfı için güçlü bir fonksiyon eğrisi geliştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, sorun,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının güven aralığının çok geniş olmasıdır. Dolayısıyla ortalama değer net bir şekilde belirli olmayacaktır. Bu nedenle, öngörülen fonksiyonun önemli noktası, A & B, C ve D zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  arasındaki uyumluluğun geliştirilmesine bağlıdır. En küçük mutlak kalıntılar (LAR) yöntemi, karesel farklılıklardan ziyade kalıntıların mutlak farkını en aza indiren bir eğriyi tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, uç değerlerin, uygulama modeli üzerinde daha az etkisi vardır. Şekil 4.9 -Şekil 4.20, A & B, C ve D zemin sınıfları için  $(V/H)_{PGA}$  oranına karşı  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı için doğrusal olmayan regresyon kullanarak güç eğrisi belirleme ve artıkları sunmaktadır. Bu şekiller için periyot aralığı R3 olmaktadır (Çizelge 3.2). Denklem (4.1) içinde gösterildiği gibi seçilen model fonksiyonu sağlam bir fonksiyondur.

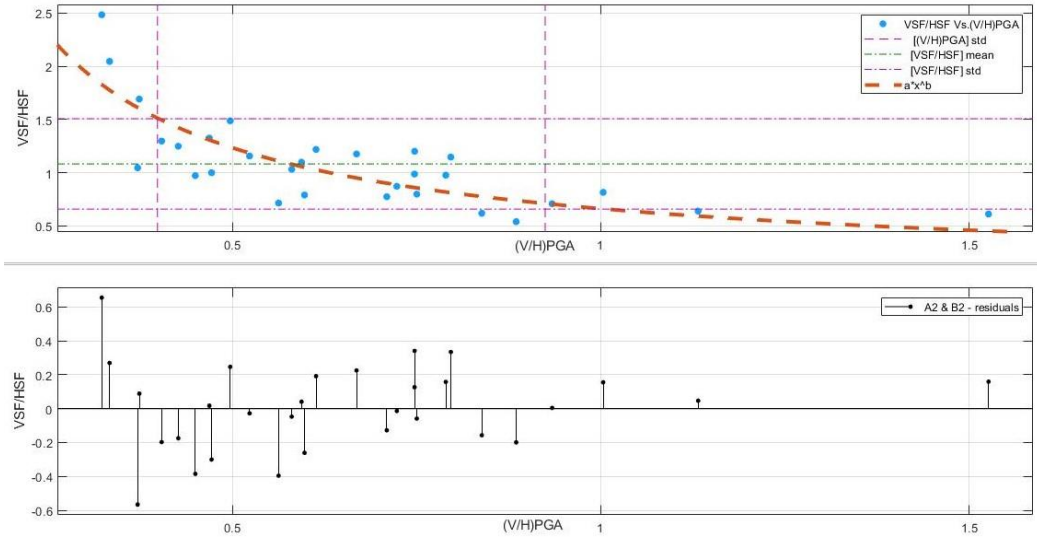
$$Y = a \times X^b \quad (4.1)$$

Geliştirilen model için belirlenen fonksiyonun doğruluğunu değerlendirmek için, hata nedeniyle kareler toplamı (SSE), çoklu korelasyon katsayısının karesi (R-kare), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve düzeltilmiş R-square kullanıldı. Sıfıra yakın RMSE değerlerinin yanı sıra, neredeyse (R-kare) ve düzeltilmiş R-kare değerleri, dört varsayılan periyot aralığı içindeki tüm zemin sınıfları için 1'e yakın olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.1-Çizelge 4.4). Veri değişiminin daha büyük oranları için belirlenen güç fonksiyonu daha iyi temsil etmektedir. Hatalardan kaynaklanan karelerin toplamı dikkate alındığında, ASCE7-16 tepki spektrumlarına ölçeklenen yer hareketleri için maksimum SSE değeri  $\leq 7$  olmuştur. Bu arada, EC8 tepki spektrumlarına ölçeklenen yer hareketleri için SSE değerleri, üçüncü periyot aralığı içinde D zemin sınıfı için 13.6 değeri belirlenmiştir. Sonuç olarak, SSE değerlerinin kabul edilebilir olduğu belirtilebilir. Kalıntılar rastgele

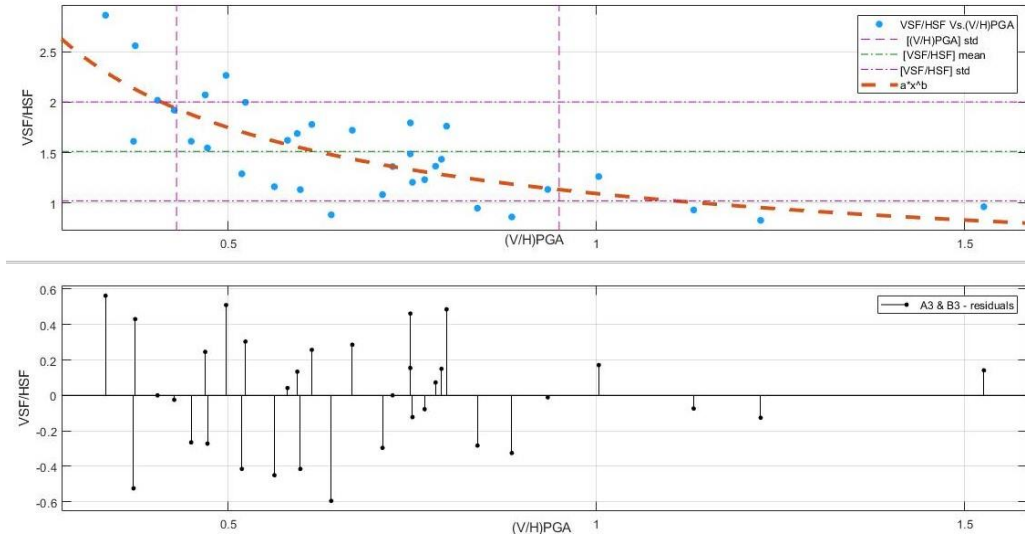
davranıyor gibi görünmesi, burada önerilen modelin verilere yeterince uyduğunu göstermektedir (Şekil 4.9 -Şekil 4.20)



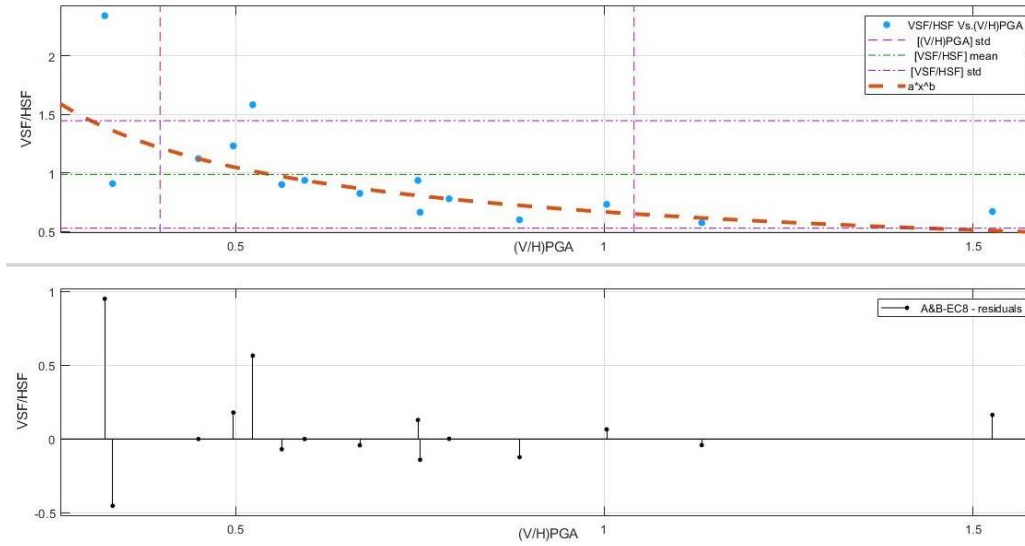
**Şekil 4.9.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A1& B1 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



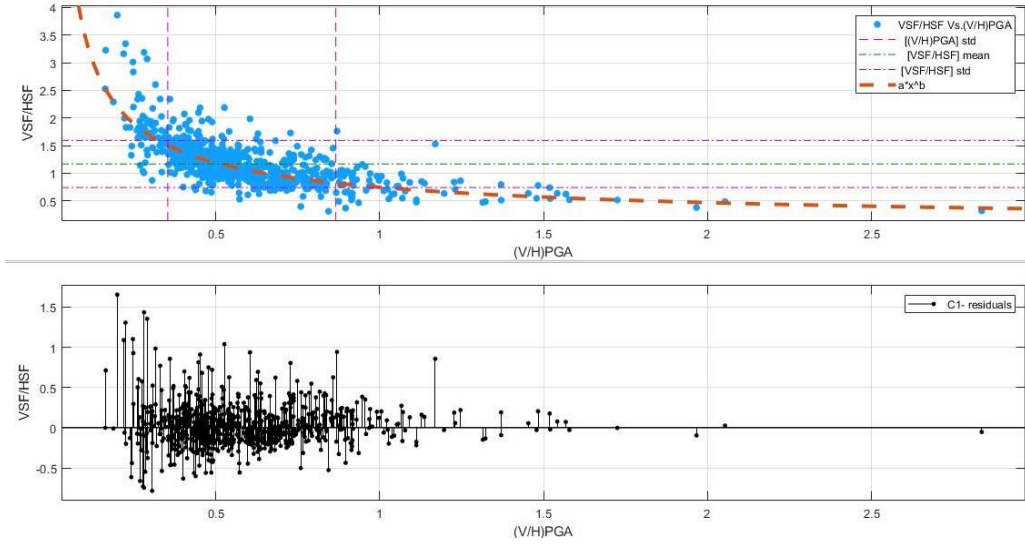
**Şekil 4.10.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A2& B2 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



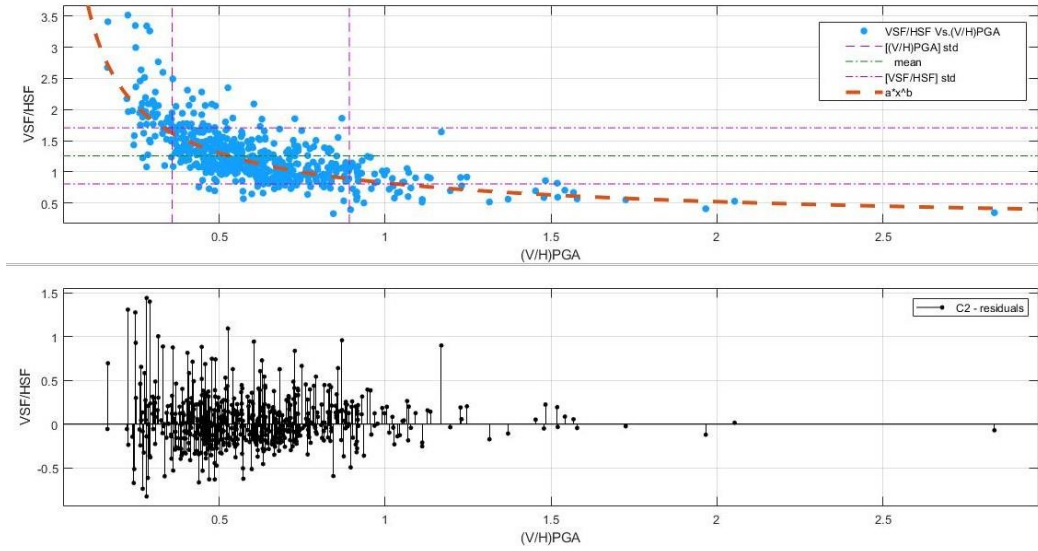
**Şekil 4.11.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A3& B3 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



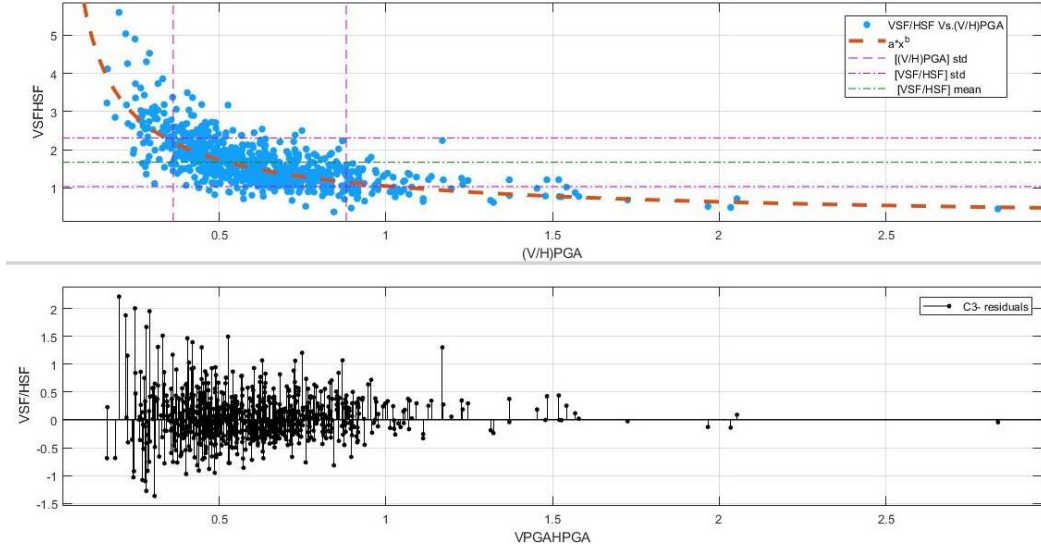
**Şekil 4.12.** EC8'deki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak A4& B4 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



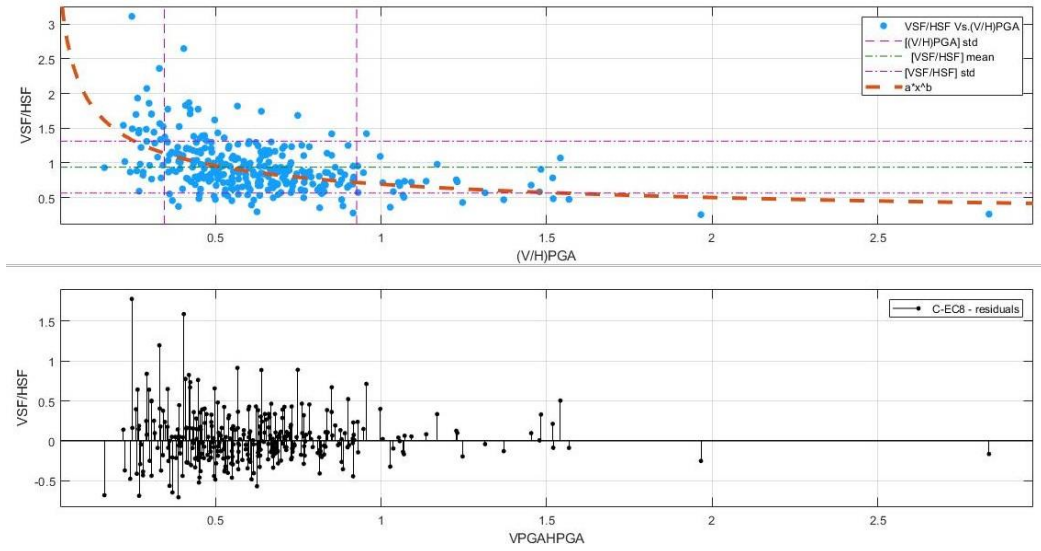
**Şekil 4.13.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C1 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



**Şekil 4.14.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C2 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.

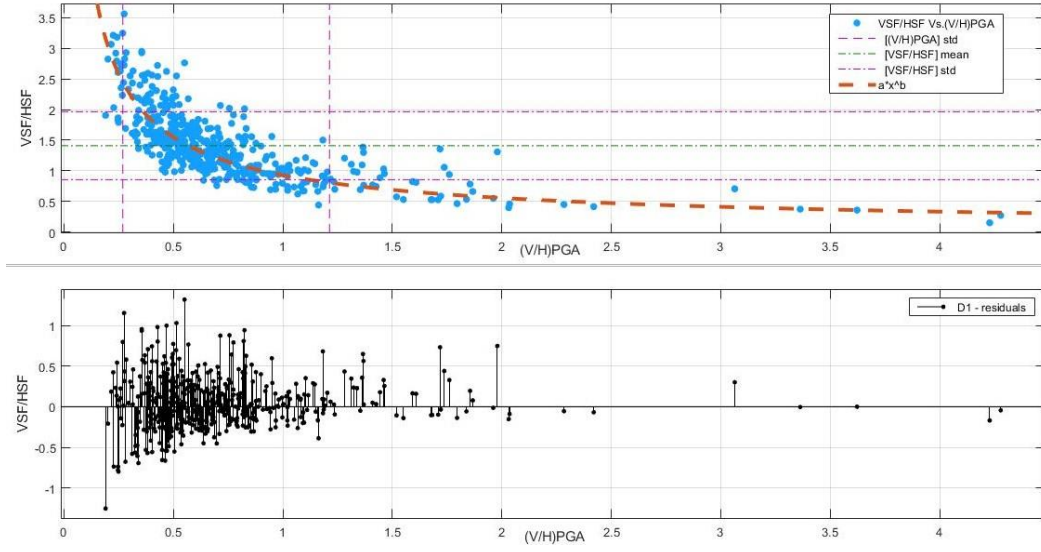


**Şekil 4.15.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C3 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.

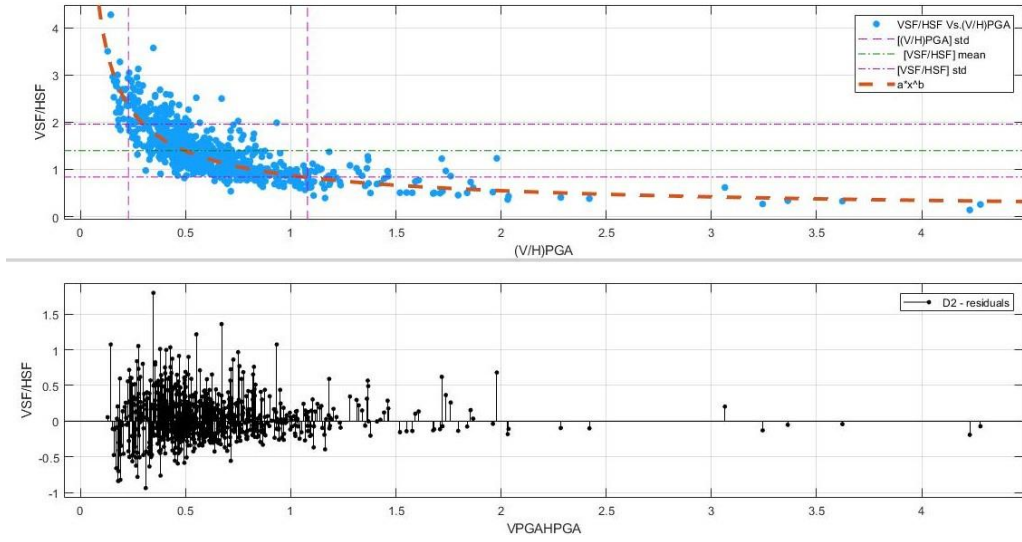


**Şekil 4.16.** EC8'deki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak C4 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.

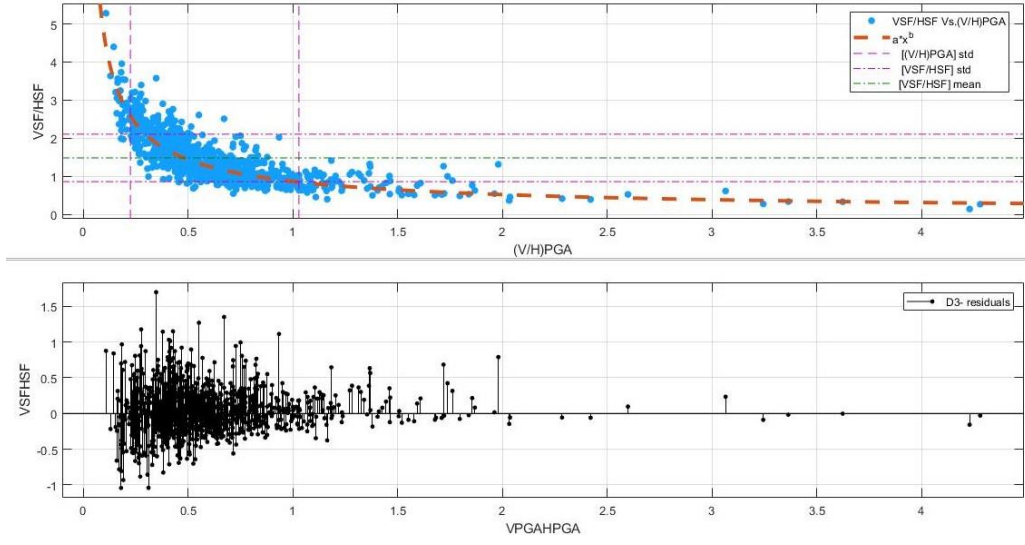




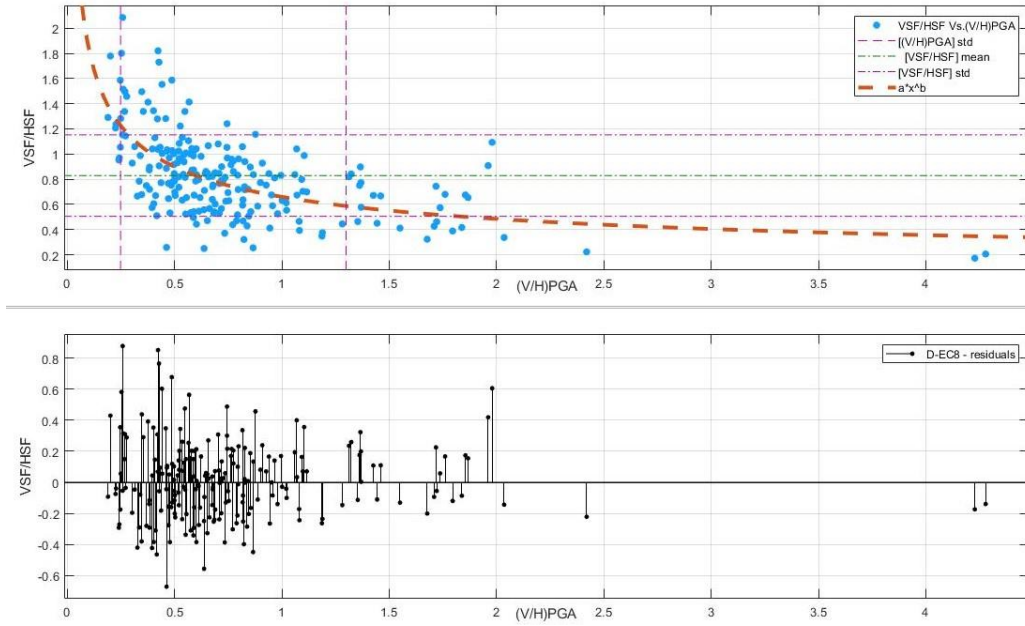
**Şekil 4.17.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D1 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



**Şekil 4.18.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D2 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



**Şekil 4.19.** ASCE7-16'daki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D3 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.



**Şekil 4.20.** EC8'deki doğrusal olmayan regresyon kullanılarak D4 zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının  $(V/H)_{PGA}$  oranına göre uygun eğri oluşturulması.

Çizelge 4.1- Çizelge 4.4 de incelenen dört periyot aralığı için uygun fonksiyon eğrilerinin geçerliliğini yöneten kabul edilebilir istatistik değerler gösterilmektedir. Her zemin sınıfına uygulanabilecek basit bir denkleme yaklaşmak için, a ve b katsayılarının ortalama değerleri çizelgelere gösterildiği gibi dikkate alınan dört periyot aralığında hesaplanmaktadır. Geliştirilen denklem (4.2),  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı ile  $(V/H)_{PGA}$  oranı arasındaki ters ilişkiye uymak için kullanılmaktadır. Şekil 4.22,  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının standart sapma frekansını göstermektedir. Elde edilen standart sapma değerlerinin %34'ü %50'den küçüktür. Bu arada, düşey bileşenin ölçeklendirme faktörünü hesaplamak için önerilen denklem, tahmin edilen standart sapma değerlerinin %85 i %50 'nin altında sonuçlanmaktadır. Şekil 4.21  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının ortalama değerlerinin frekansını göstermektedir. Veri ortalama değerlerinin %70'i [1.25- 1.5 saniye] aralığına düşmektedir. Düşey bileşenin ölçeklendirme faktörünü hesaplamak için önerilen denklem, [1.25- 1.5] aralığında tahmin edilen ortalama değerlerin %72'siyle sonuçlanmaktadır. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22, önerilen denklemin uygulanmasının  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının standart sapma değerlerinde önemli bir düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Artış oranının kabul edilebilir ortalama değerleri için Çizelge 4.5- Çizelge 4.8 e bakılabilir. Bu nedenle, yer hareketinin düşey bileşenin ölçeklendirme faktörü, bu çalışmayı sonuçlandıran Denklem (4.3) 'de belirtildiği gibi yatay karşılığının ölçekleme faktörüne dayalı olarak elde edilebilir.

$$V_{SF} / H_{SF} = a \times (V / H_{PGA})^b \quad (4.2)$$

$$V_{SF} = F \times H_{SF} \quad (4.3)$$

$$F = a \times V / H_{PGA}^b \quad (4.4)$$

Çizelge 4.1- Çizelge 4.4 de a ve b değerleri, önerilen dört periyot aralığında her zemin sınıfı için ortalama değerler olmaktadır.

**Çizelge 4.1.** ASCE7-16 ye göre, A&B zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı ile  $(V/H)_{PGA}$  oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	SSE	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	Coff. a	Coff. b	(a) Ortalama	(b) Ortalama
1	A1 & B1	1.801	0.605	0.590	0.253	0.662	-0.769	0.716	-0.808
	A2& B2	2.027	0.591	0.576	0.269	0.690	-0.737		
	A3 & B3	3.508	0.562	0.562	0.354	0.795	-0.918		
2	A1 & B1	2.173	0.485	0.468	0.265	0.747	-0.582	0.713	-0.908
	A2& B2	2.140	0.657	0.645	0.277	0.625	-1.041		
	A3 & B3	4.704	0.610	0.598	0.410	0.766	-1.102		
3	A1 & B1	1.599	0.573	0.556	0.253	0.681	-0.650	0.813	-0.741
	A2& B2	1.919	0.633	0.620	0.262	0.663	-0.897		
	A3 & B3	3.273	0.588	0.575	0.320	1.094	-0.676		
4	A1 & B1	1.349	0.758	0.746	0.259	0.636	-1.119	0.754	-1.121
	A2& B2	2.247	0.713	0.699	0.327	0.743	-1.048		
	A3 & B3	6.736	0.682	0.668	0.555	0.882	-1.197		
Ortalama								0.75	-0.90

**Çizelge 4.2** ASCE7-16 ye göre, C zemin sınıfı için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı ile  $(V/H)_{PGA}$  oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	SSE	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	Coff. a	Coff. b	(a) Ortalama	(b) Ortalama
1	C1	0.620	0.997	0.997	0.031	0.803	-0.875	0.868	-0.848
	C2	0.659	0.995	0.995	0.036	0.850	-0.829		
	C3	5.371	0.798	0.792	0.532	0.951	-0.839		
2	C1	0.898	0.995	0.995	0.037	0.796	-0.824	0.884	-0.816
	C2	0.628	0.995	0.995	0.035	0.860	-0.792		
	C3	1.107	0.996	0.996	0.040	0.996	-0.833		
3	C1	1.247	0.990	0.990	0.042	0.747	-0.673	0.894	-0.687
	C2	0.961	0.992	0.992	0.041	0.882	-0.662		
	C3	3.778	0.988	0.998	0.071	1.052	-0.725		
4	C1	4.767	0.972	0.972	0.087	0.769	-0.797	0.915	-0.781
	C2	1.124	0.992	0.992	0.048	0.841	-0.787		
	C3	5.284	0.988	0.988	0.089	1.134	-0.758		
Ortalama								0.890	-0.783

**Çizelge 4.3.** ASCE7-16 ye göre, D zemin sınıfı için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı ile  $(V/H)_{PGA}$  oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	SSE	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	Coff. a	Coff. b	(a) Ortalama	(b) Ortalama
1	D1	0.508	0.997	0.997	0.034	0.952	-0.933		
	D2	1.098	0.995	0.995	0.041	0.817	-0.876		
	D3	2.421	0.993	0.993	0.052	0.815	-0.836	0.861	-0.882
2	D1	0.349	0.998	0.998	0.028	0.932	-0.887		
	D2	0.866	0.997	0.997	0.035	0.849	-0.837		
	D3	1.863	0.996	0.996	0.045	0.858	-0.846	0.880	-0.857
3	D1	0.882	0.993	0.993	0.043	0.930	-0.737		
	D2	2.335	0.990	0.990	0.055	0.873	-0.671		
	D3	5.036	0.987	0.987	0.072	0.871	-0.727	0.891	-0.712
4	D1	0.564	0.996	0.996	0.037	0.920	-0.879		
	D2	1.603	0.995	0.995	0.049	0.865	-0.841		
	D3	4.055	0.993	0.993	0.068	0.884	-0.867	0.890	-0.862
Mean								0.880	-0.828

**Çizelge 4.4.** EC8 ye göre, A & B, C ve D zemin sınıfları için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranı ile  $(V/H)_{PGA}$  oranı arasındaki ilişkiye uyan sağlam fonksiyonunun istatistikleri.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	SSE	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	Coff. a	Coff. b	(a) Ortalama	(b) Ortalama
A & B	1	1.020	0.781	0.764	0.280	0.894	-0.881		
	2	0.563	0.893	0.885	0.208	0.817	-0.984		
	3	0.282	0.904	0.896	0.147	0.669	-0.647		
	4	0.483	0.924	0.917	0.209	0.814	-1.085	0.799	-0.899
C	1	0.540	0.995	0.995	0.041	0.951	-0.834		
	2	0.427	0.996	0.996	0.035	0.937	-0.763		
	3	0.534	0.988	0.988	0.041	0.693	-0.468		
	4	6.558	0.864	0.863	0.290	0.864	-0.756	0.861	-0.705
D	1	10.730	0.821	0.821	0.202	0.781	-0.890		
	2	8.079	0.831	0.831	0.173	0.747	-0.832		
	3	13.610	0.408	0.405	0.250	0.660	-0.466		
	4	0.178	0.996	0.996	0.026	0.697	-0.856	0.721	-0.761

**Çizelge 4.5.** ASCE7-16 ye göre, A&B zemin sınıfları için veriler ve tahmin edilen değerler için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının Minimum, Maksimum ve Ortalama değerleri ile standart sapması.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	$S_{D1}/S_{Ds}$	İstasyon No.	Min.	Max.	Veri Ortalaması	Öngörülen Ortalama	Ortalama diff%	Max. Diff.	Veri std%	Öngörülen std%	std diff%
R1	A1 & B1	0.5	30	0.353	2.257	0.982	1.175	16.426	-0.193	39.621	38.710	-2.353
	A2& B2	0.4&0.35	30	0.363	2.306	1.020	1.175	13.191	-0.155	41.330	38.700	-6.796
	A3 & B3	0.2	30	0.423	2.782	1.253	1.164	-7.646	0.089	53.496	40.300	-32.744
R2	A1 & B1	0.5	33	0.487	1.906	1.075	1.216	11.595	-0.141	36.311	34.512	-5.213
	A2& B2	0.4&0.35	30	0.361	2.323	1.054	1.175	10.298	-0.121	46.408	38.161	-21.611
	A3 & B3	0.2	30	0.432	3.241	1.342	1.275	-5.255	0.067	64.496	38.716	-66.587
R3	A1 & B1	0.5	27	0.503	2.060	0.984	1.158	15.026	-0.174	38.000	28.500	-33.333
	A2& B2	0.4&0.35	30	0.541	2.485	1.084	1.137	4.661	-0.053	42.500	27.900	-52.330
	A3 & B3	0.2	34	0.829	2.861	1.512	1.098	-37.705	0.414	49.100	25.600	-91.797
R4	A1 & B1	0.5	22	0.253	2.255	1.068	1.181	9.568	-0.113	51.548	41.283	-24.865
	A2& B2	0.4&0.35	23	0.284	2.725	1.166	1.174	0.681	-0.008	59.612	40.471	-47.296
	A3 & B3	0.2	25	0.350	4.317	1.678	1.320	-27.121	0.358	96.258	40.271	-139.026

**Çizelge 4.6.** ASCE7-16 ye göre, C zemin sınıfı için veriler ve tahmin edilen değerler için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının Minimum, Maksimum ve Ortalama değerleri ile standart sapması.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	$S_{D1}/S_{DS}$	İstasyon No.	Min.	Max.	Veri Ortalaması	Öngörülen Ortalama	Ortalama diff%	Max. Diff.	Veri std%	Öngörülen std%	std diff%
R1	C1	0.6	651	0.329	5.162	1.361	1.440	5.486	-0.079	55.199	46.600	-18.453
	C2	0.5	500	0.340	5.322	1.359	1.401	2.998	-0.042	52.896	44.690	-18.362
	C3	0.25	665	0.391	5.568	1.564	1.430	-9.371	0.134	63.198	46.530	-35.822
R2	C1	0.6	668	0.331	4.820	1.321	1.445	8.581	-0.124	51.713	46.640	-10.877
	C2	0.5	515	0.348	5.016	1.357	1.404	3.348	-0.047	51.426	44.732	-14.965
	C3	0.25	689	0.395	5.366	1.652	1.433	-15.283	0.219	65.552	46.609	-40.642
R3	C1	0.6	706	0.312	3.861	1.168	1.208	3.311	-0.040	42.700	31.400	-35.987
	C2	0.5	575	0.328	3.517	1.256	1.192	-5.369	0.064	45.100	31.700	-42.271
	C3	0.25	761	0.374	5.599	1.674	1.320	-26.818	0.354	63.700	31.100	-104.823
R4	C1	0.6	625	0.241	3.908	1.242	1.458	14.815	-0.216	52.052	47.336	-9.963
	C2	0.5	486	0.259	4.188	1.295	1.407	7.960	-0.112	52.855	45.338	-16.580
	C3	0.25	661	0.322	6.139	1.785	1.441	-23.872	0.344	80.183	46.978	-70.682

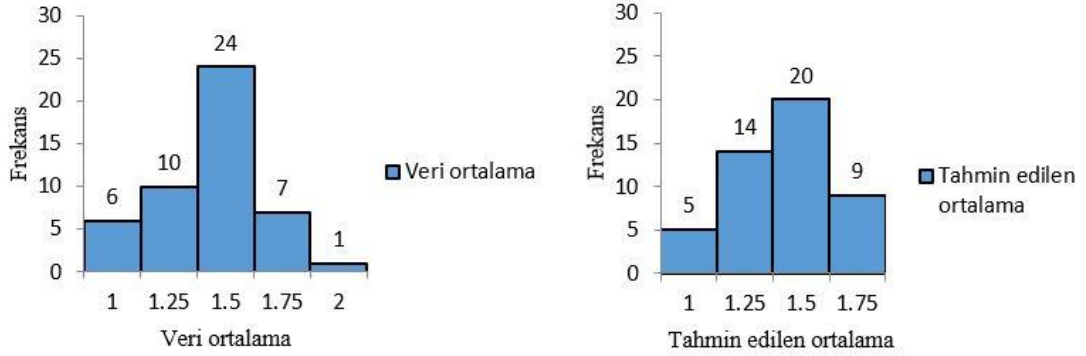
**Çizelge 4.7.** ASCE7-16 ye göre, D zemin sınıfı için veriler ve tahmin edilen değerler için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının Minimum, Maksimum ve Ortalama değerleri ile Standart sapması.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	$S_{D1}/S_{DS}$	İstasyon No.	Min.	Max.	Veri Ortalaması	Öngörülen Ortalama	Ortalama diff%	Max. Diff.	Veri std%	Öngörülen std%	std diff%
R1	D1	0.7	423	0.144	4.291	1.435	1.272	-12.814	0.163	63.134	44.582	-41.613
	D2	0.5	665	0.121	4.824	1.348	1.400	3.714	-0.052	59.196	54.800	-8.022
	D3	0.4	878	0.120	5.491	1.412	1.542	8.431	-0.130	64.570	60.203	-7.254
R2	D1	0.7	434	0.153	3.955	1.402	1.271	-10.307	0.131	58.921	44.463	-32.517
	D2	0.5	683	0.135	4.655	1.407	1.440	2.292	-0.033	60.655	55.082	-10.118
	D3	0.4	885	0.138	5.885	1.544	1.540	-0.260	0.004	71.948	63.021	-14.165
R3	D1	0.7	472	0.153	3.561	1.411	1.124	-25.534	0.287	55.500	35.400	-56.780
	D2	0.5	764	0.141	4.278	1.399	1.328	-5.346	0.071	56.100	42.700	-31.382
	D3	0.4	983	0.148	5.280	1.487	1.270	-17.087	0.217	62.200	43.100	-44.316
R4	D1	0.7	420	0.155	3.829	1.377	1.282	-7.410	0.095	59.411	44.553	-33.349
	D2	0.5	668	0.144	5.018	1.435	1.450	1.034	-0.015	66.632	55.937	-19.120
	D3	0.4	883	1.509	6.553	1.607	1.540	-4.351	0.067	82.190	65.114	-26.225

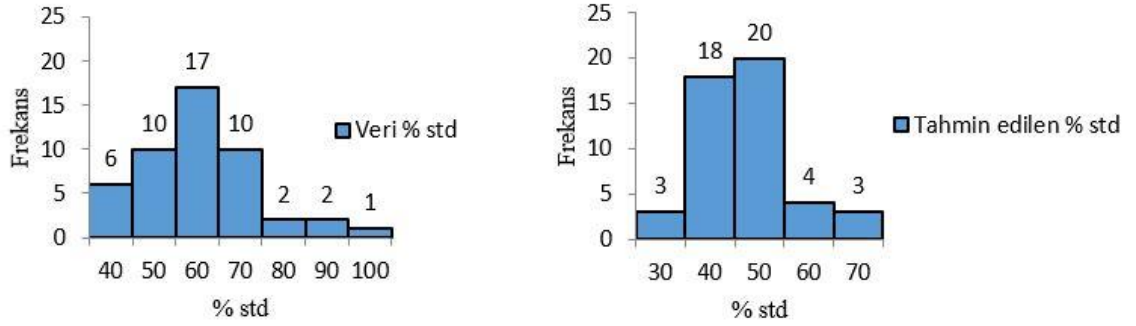


**Çizelge 4.8.** EC8 koduna göre A & B, C ve D zemin sınıfları için tahmin edilen değerler ve veriler için  $V_{SF}/H_{SF}$  oranının minimum, maksimum ve Ortalama değerleri ile standart sapması.

Periyot aralığı	Zemin sınıfı	$S_{D1}/S_{DS}$	İstasyon No.	Min.	Max.	Veri Ortalaması	Öngörülen Ortalama	Ortalama diff%	Max. Diff.	Veri std%	Öngörülen std%	std diff%
R1	A4 & B4	EC 8	15	0.475	2.862	1.321	1.221	-8.190	0.100	57.699	45.240	-27.540
	C4	EC8	327	0.400	6.260	1.466	1.196	-22.575	0.270	60.000	33.600	-78.571
	D4	EC8	266	0.117	3.168	1.104	0.927	-19.094	0.177	47.606	30.780	-54.665
R2	A4 & B4	EC 8	15	0.453	2.765	1.328	1.220	-8.852	0.108	61.448	48.259	-27.330
	C4	EC8	335	0.402	5.749	1.419	1.207	-17.564	0.212	55.464	34.414	-61.167
	D4	EC8	272	0.119	2.802	1.034	0.927	-11.543	0.107	41.996	30.519	-37.606
R3	A4 & B4	EC 8	15	0.576	2.340	0.988	1.098	10.018	-0.110	45.800	31.500	-45.397
	C4	EC8	320	0.253	3.112	0.939	1.189	21.026	-0.250	37.400	32.900	-13.678
	D4	EC8	220	0.173	2.085	0.829	1.100	24.636	-0.271	32.400	31.300	-3.514
R4	A4 & B4	EC 8	13	0.331	2.780	1.378	1.232	-11.851	0.146	72.700	52.200	-39.272
	C4	EC8	298	0.273	3.675	1.279	1.219	-4.922	0.060	49.299	35.102	-40.445
	D4	EC8	252	0.119	2.642	0.970	0.931	-4.189	0.039	39.900	30.900	-29.126



**Şekil 4.21:** Veri ortalama değerleri frekansı ve tahmini ortalama değerler frekansı.



**Şekil 4.22.** Veri standart sapma frekansı ve tahmini standart sapma frekansı.

#### 4.2. Yüksek Yapılarda Dalga Yayılımının Sayısal İrdelenmesi

300 m yüksekliğe sahip temsili yüksek bir yapı modeli boyunca yayılan deformasyon dalgalarının özelliklerini incelemek için, idealize edilmiş sürekli ve ayrık modellerin ankastre olan tabanından atım şeklinde yarım sinüs dalgası olarak enine kayma ve boyuna basınç dalgaları uygulanmaktadır. Dalga yayılım analizi, merkezi fark operatörünü kullanan ABAQUS/Explicit yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Merkezi fark yöntemi şartlı olarak kararlıdır. Kararlılık, modeldeki en küçük elemanın maksimum frekansına bağlıdır. Zaman artış boyutunun sabit zaman artışına oranı sonuçları yönetmektedir. Birinci dereceden sürekli elemanlar için oluşturulan köşegen kütle ve sönüm matrisleri için; sistemin denklemleri ayrık denklemler olarak çözülecektir.

Bir yerdeğiştirme dalgası, yüksek bir binanın tabanına ulaştığında, tepe noktasının serbest üst yüzeyine ulaşana kadar yapı yüksekliği boyunca ilerlemektedir. Buradan geri dönerek yapı tabanına kadar ilerlemektedir. Bundan sonra dönüş karakteristiklerine bağlı olarak yine yayılabilmektedir. Burada dikkate alınan yüksek yapı modelinde birbirine bağlı ögeler zinciri düşünülerek, dalganın yükseklik boyunca bir boyutta yayıldığı kabul edilmektedir. Döşeme ve kiriş gibi yatay elemanlar, hareket eden dalganın kısmen iletileceği ve kısmen yansıtılacağı bir dalga yönlendirici gibi davranmaktadır. Nihayetinde bu modelde, yukarı ve aşağı doğru hareket eden senkronize dalgalardan oluşan bir sistem oluşturulmaktadır. Oluşturulan model için (1) tepki süresi gecikmesi, (2) iletilen dalgalardaki çoğaltma, (3) negatif polarizasyon ile dalgaların yansımaları, (4) pozitif polarizasyon ile dalgaların iletimi, (5) ilerleyen dalga tepe noktalarının kayması ve (6) serbest uçtaki dalga büyüklüğünün genliği parametreleri irdelenmektedir.

#### **4.2.1. Kayma dalgası**

Sürekli model boyunca yukarı ve aşağı doğru ilerleyen kayma deformasyon dalgalarının 30 saniyelik süre boyunca değişimi Şekil 4.23'de sunulmaktadır. Ayrık model boyunca yukarı ve aşağı giden kayma deformasyon dalgalarının 3 saniye süresince değişimine ilişkin bir yakınlaştırma penceresi Şekil 4.24'de görülmektedir. Kayma dalgasının hızı  $V_s = \sqrt{G / \rho}$  olarak hesaplanmaktadır. Beton sınıfı C50 için  $V_s = 2483.278$  m/s olarak dikkate alınmıştır. Bu nedenle, sabit tabanda uygulanan atım şeklindeki dalga, 0.12 saniyede sürekli modelin en üst serbest yüksekliğine (300m) ulaşabilmektedir. Bu durum, sürekli model için Şekil 4.27 den görülebilir. Ayrık sayısal model için, uygulanan atım dalgası en üst yüksekliğe 0.15 saniyede ulaşmaktadır. Bu gecikme süreksizliğin etkisine bağlanabilir (Şekil 4.28).

Sürekli model için 3, 24, 27 m yüksekliklerinde ayrık model için sırasıyla 3, 18, 21 m yüksekliklerinde 2 saniye boyunca deformasyon dalgası formu Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 de gösterilmektedir. Çıktılar incelendiğinde birinci çizgide yukarı doğru hareket eden dalgaların tepe noktalarında hafif bir kayma olduğu ve ikinci çizgide zaman gecikmesi ile çakışan tepe noktalarında önemli bir kayma olduğu görülmektedir. Alternatif olarak,

dalga yayılma fiziği ile tepe noktalarının kaymaları yerine deformasyon dalgasının varış zamanı izlenerek de sayısal olarak yakalanabilir.

Sönümü ihmal etmekten dolayı, sürekli ve ayırık modellerin en üstteki serbest yükseklik yerine farklı yüksekliklerde iletilen ve yansıtılan dalgaların genliği [0.9- 1] aralığına düşmektedir. Serbest üst seviyedeki deformasyon dalgasının genliği iki katına çıkmaktadır (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24). Dalga genliğindeki büyüme, üst serbest yükseklikte çok sayıda yansıyan dalgalardan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 de mesafe ile varış/intikal süresi arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir. Bu durum her iki modelde de sabit bir kayma dalgası hızı olduğuna işaret etmektedir (Şekil 4.29 ve Şekil 4.30). Yukarı doğru iletilen dalga, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 'de gösterildiği gibi pozitif bir polarite ile yukarı doğru yayılmaktadır. Deformasyon dalgası modelin en üst serbest seviyesine ulaştığında, aşağı doğru negatif bir polarite ile yansımaktadır (Şekil 4.27 ve Şekil 4.28). Bu gözlem, sarım çözme (de-convolution) teorisinin temellerini desteklemektedir (Snieder ve ark. 2006).

#### **4.2.2. Boyuna Basınç Dalgası**

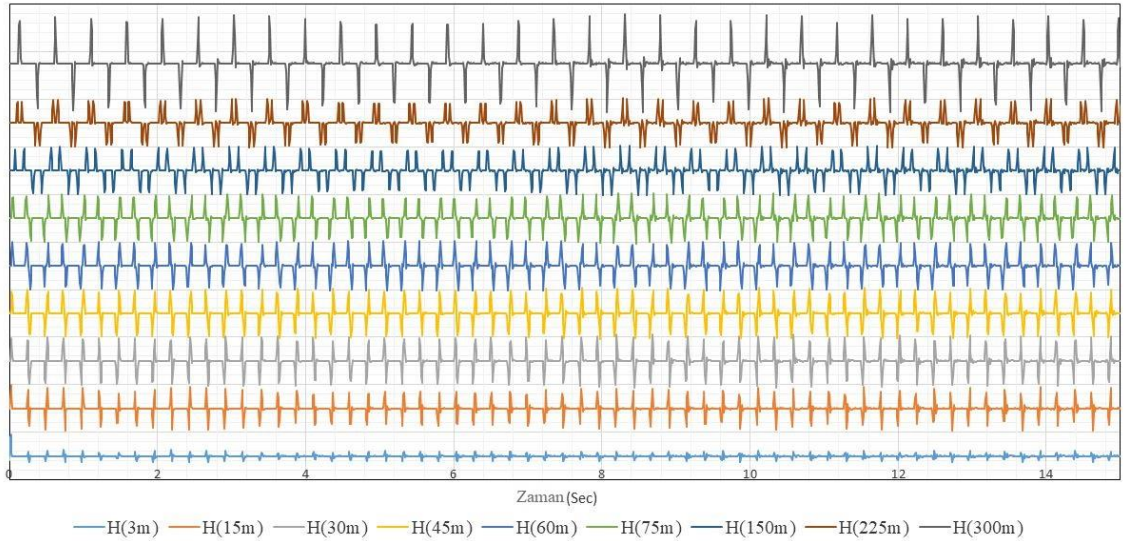
Sürekli model boyunca yukarı ve aşağı ilerleyen deformasyon dalgalarının 15 saniyelik zaman içindeki değişimi Şekil 4.31 'de sunulmaktadır. Ayırık model boyunca yukarı ve aşağı giden kayma deformasyon dalgalarının 3 saniyelik zaman değişimine ilişkin bir yakınlaştırma penceresi ise Şekil 4.32 'de sunulmaktadır. Boyuna dalganın hızı  $V_P = \sqrt{E/\rho}$  olarak hesaplanmaktadır. Böylece, beton sınıfı C50 için  $V_P = 3847.077$  m /s. Bu nedenle, sabit tabanda uygulanan atım şeklindeki dalga, sürekli modelin en üst serbest yüksekliğine (300 m) 0.07 saniyede ulaşmaktadır. Bu durum Şekil 4.35 den görüldüğü gibi sürekli model için sayısal olarak belirlenen değerle uyumludur. Ayırık model için, uygulanan atım dalgası en üst yüksekliğe 0.09 saniyede ulaşmaktadır. Bu gecikme süresizliğin etkisine bağlanabilir (Şekil 4.36).

Sürekli model için 3, 39, 42 m ve ayırık model için sırasıyla 3, 27, 30 m yüksekliklerde 2 saniye boyunca deformasyon dalgasının formu Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 de gösterilmektedir. Dikkate alınan oranlara göre, birinci çizgi yukarı doğru hareket eden

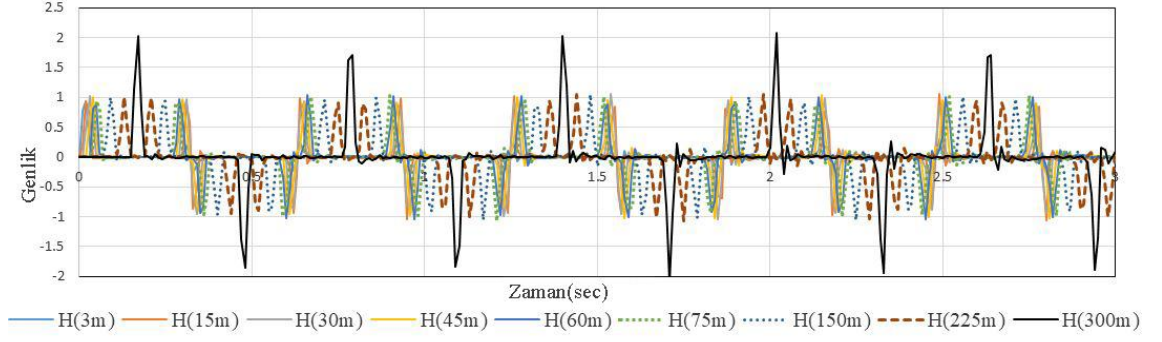
dalganın tepe noktasında hafif bir kayma olduğunu ve ikinci çizgi, zaman gecikmesinin oluşumuyla çakışan tepe noktalarında önemli bir kayma göstermektedir. Alternatif olarak, dalga yayılma fiziği açısından, tepe kaymaları yerine deformasyon dalgasının varış zamanı izlenerek de sayısal olarak belirlenebilir.

Sönümü ihmal etmekten dolayı, sürekli ve ayırık modellerin en üstteki serbest yükseklik yerine farklı yüksekliklerde iletilen ve yansıtılan dalgaların genliği [0.9- 1] aralığına düşmektedir. Serbest üst seviyedeki deformasyon dalgasının genliği iki katına çıkmaktadır (Şekil 4.31 ve Şekil 4.32). Dalga genliğindeki büyüme, üst serbest yükseklikte çok sayıda yansıyan dalgalardan kaynaklanmaktadır.

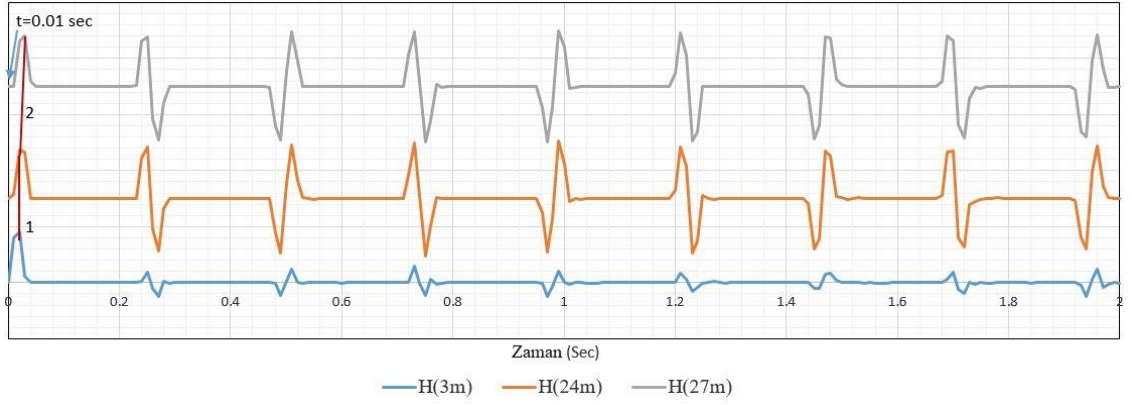
Hem sürekli hem de ayırık modellerdeki boyuna basınç dalgasının hızları zamanla azalmaktadır. Bu durum kütlelerin etkisine atfedilebilir (Şekil 4.37 ve Şekil 4.38). İletilen dalga, pozitif bir polarite ile yukarı doğru yayılmakta ve deformasyon dalgası modelin en üst seviyesine ulaştığında negatif bir polarite ile aşağıya doğru yansımaktadır (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36). Yine, bu gözlem sarım çözme (de-convolution) teorisinin temellerini desteklemektedir (Snieder ve ark. 2006)



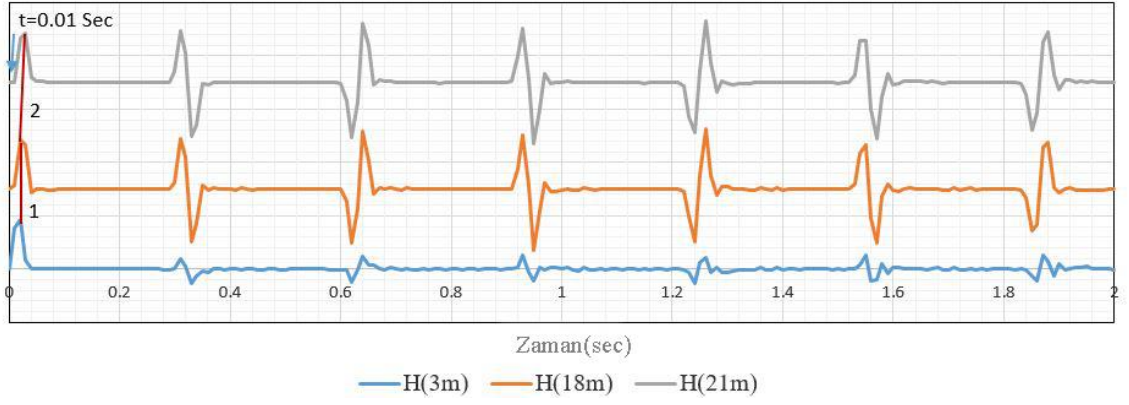
**Şekil 4.23.** Sürekli sayısal model üzerinden 3, 15, 30, 45,60, 75, 150, 225 ve 300m seviyelerinde iletilen ve yansıyan yatay deformasyonun dalgaları sistemi.



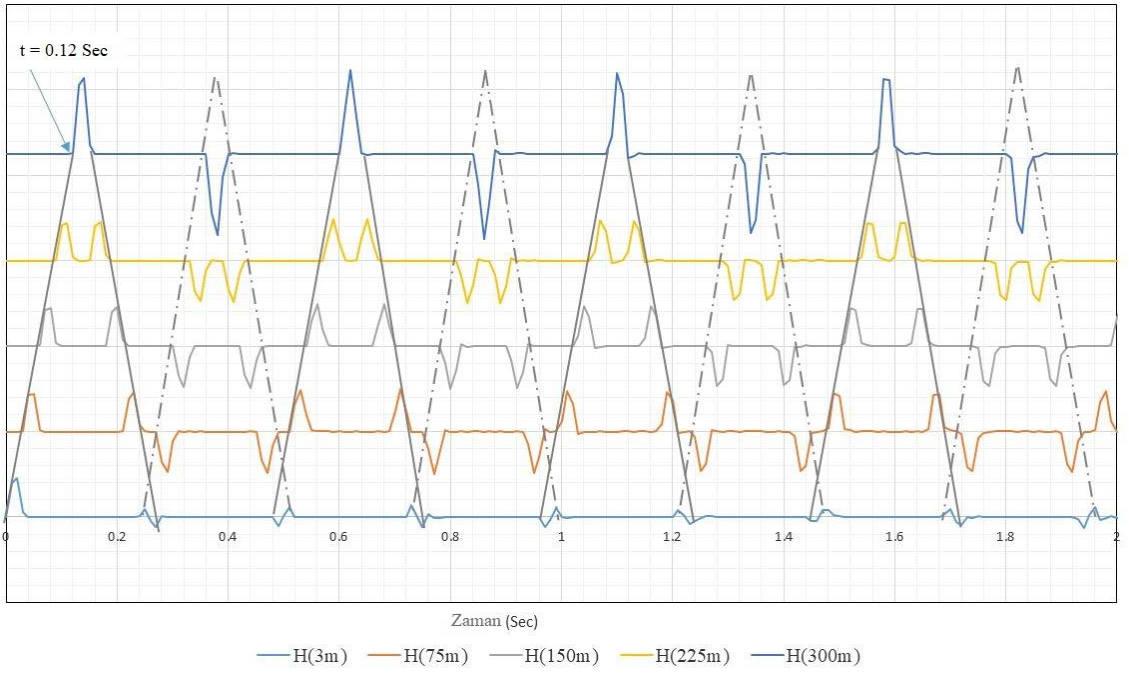
**Şekil 4.24.** Ayrık sayısal model üzerinden 3, 15, 30, 45, 60, 75, 150, 225 ve 300m seviyelerinde iletilen ve yansıtılan yatay deformasyon dalgaları sistemi.



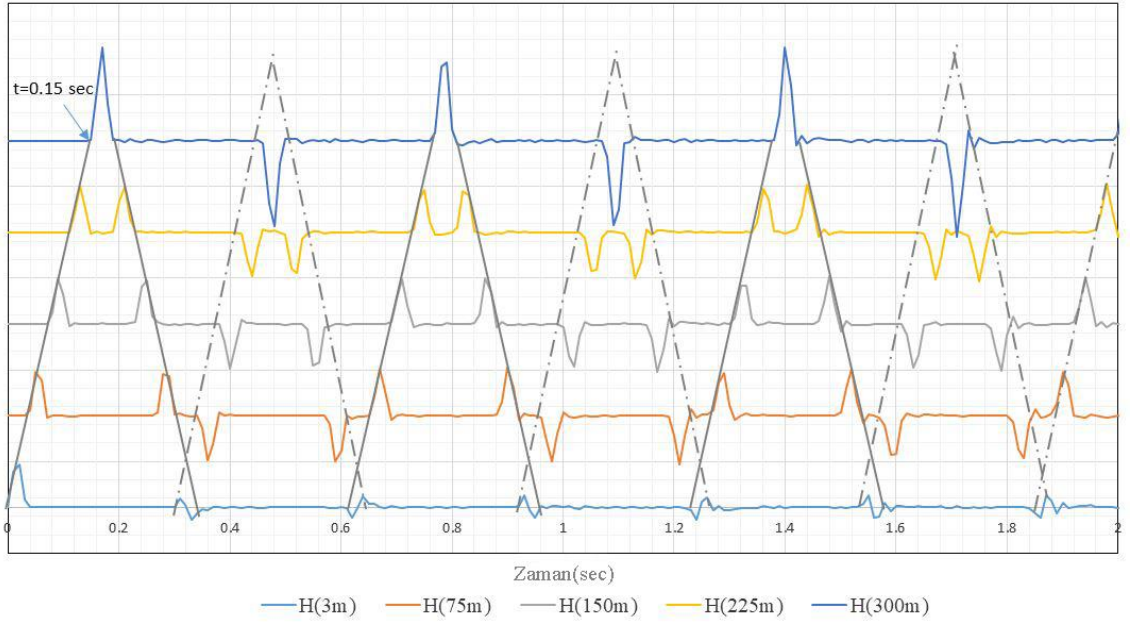
**Şekil 4.25.** Sürekli model için 3, 24 ve 27m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi.



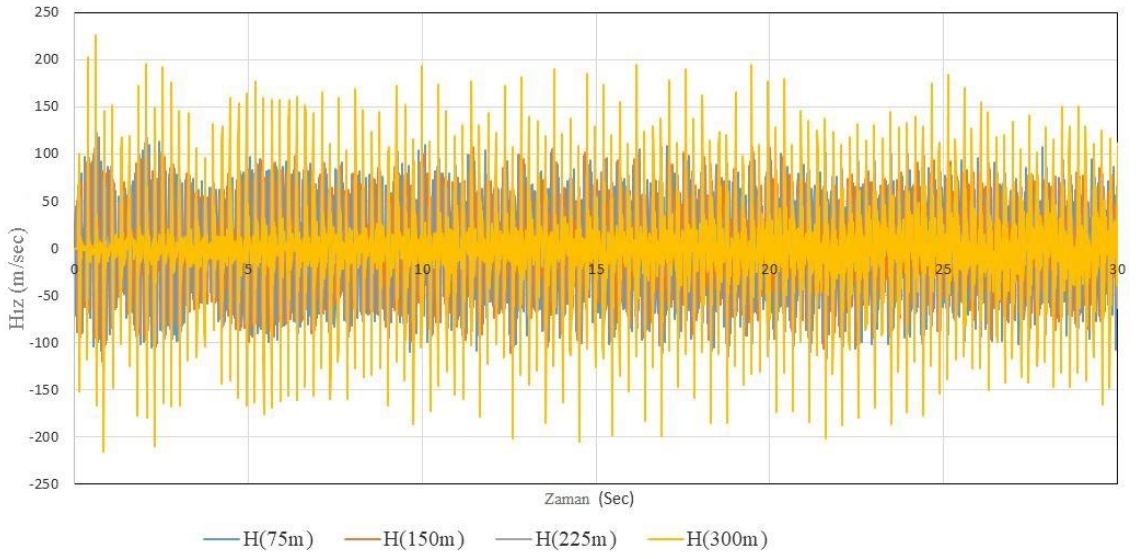
**Şekil 4.26.** Ayrık model için 3, 18 ve 21m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi.



**Şekil 4.27.** Sürekli model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi.

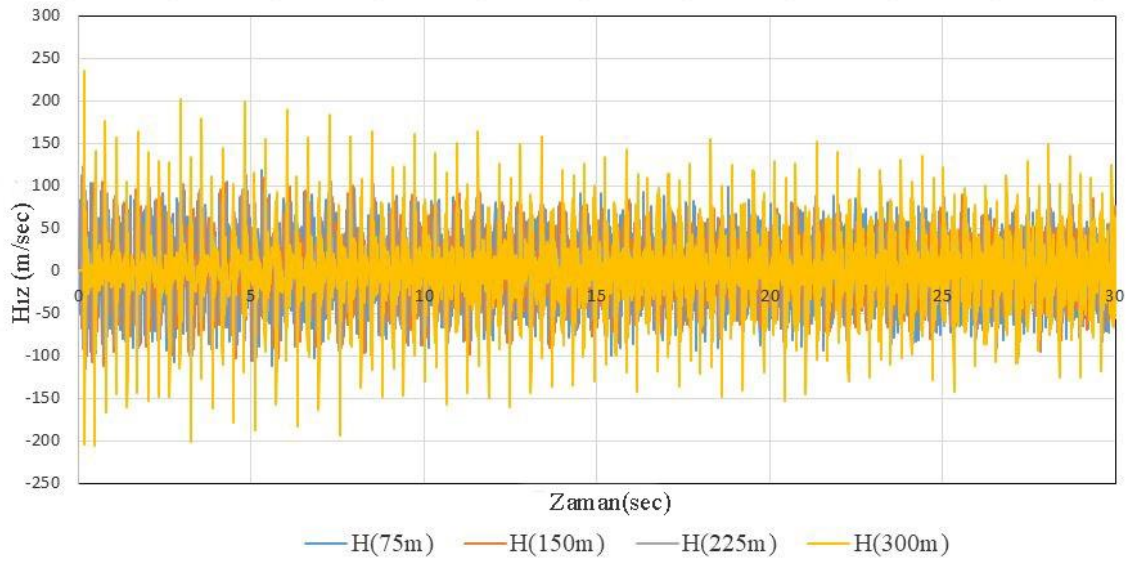


**Şekil 4.28.** Ayırık model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde yatay deformasyonun zamanla değişimi.

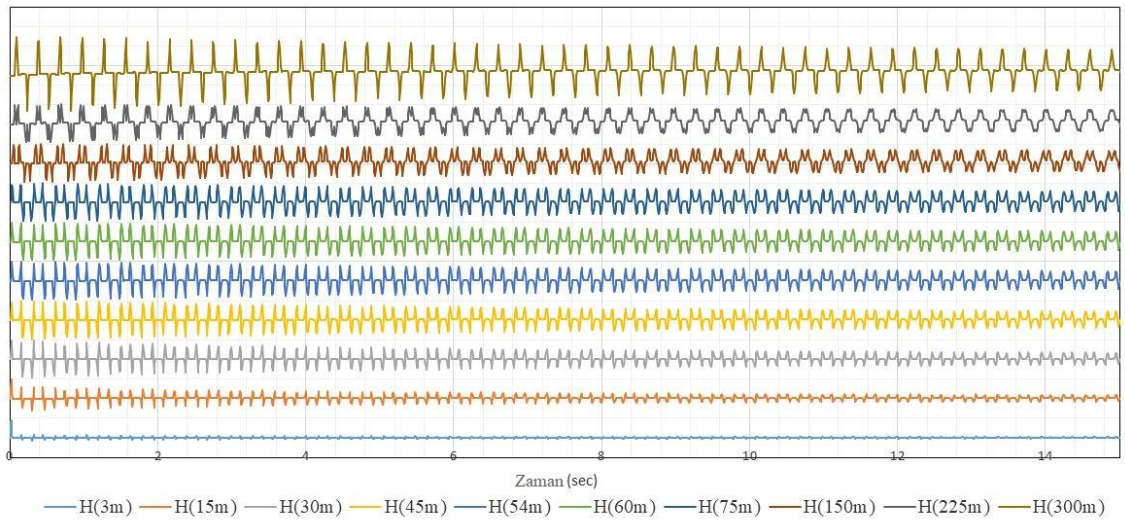


**Şekil 4.29.** Sürekli sayısal model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde kayma hızının zamanla değişimi.

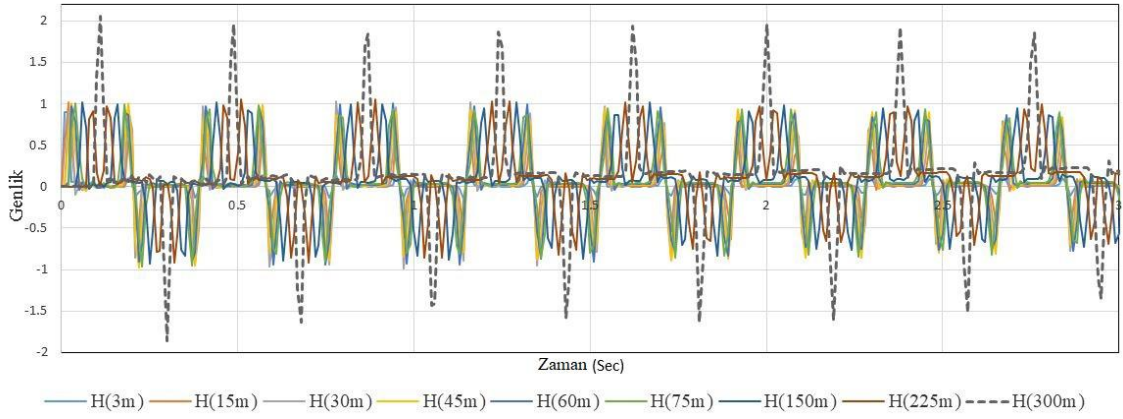




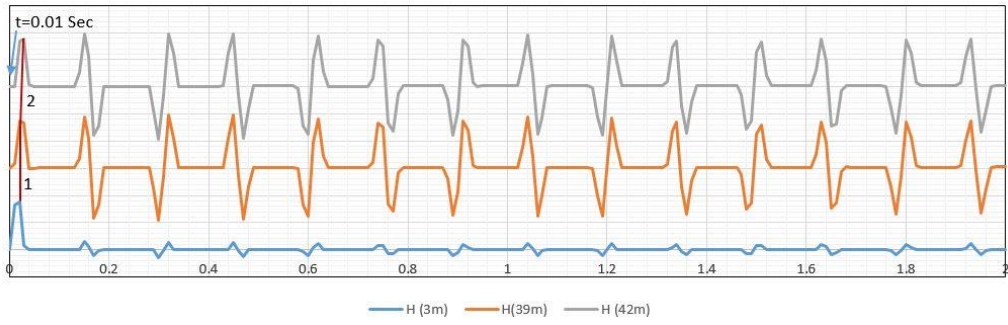
**Şekil 4.30.** Ayırık sayısal model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde kayma hızının zamanla değişimi.



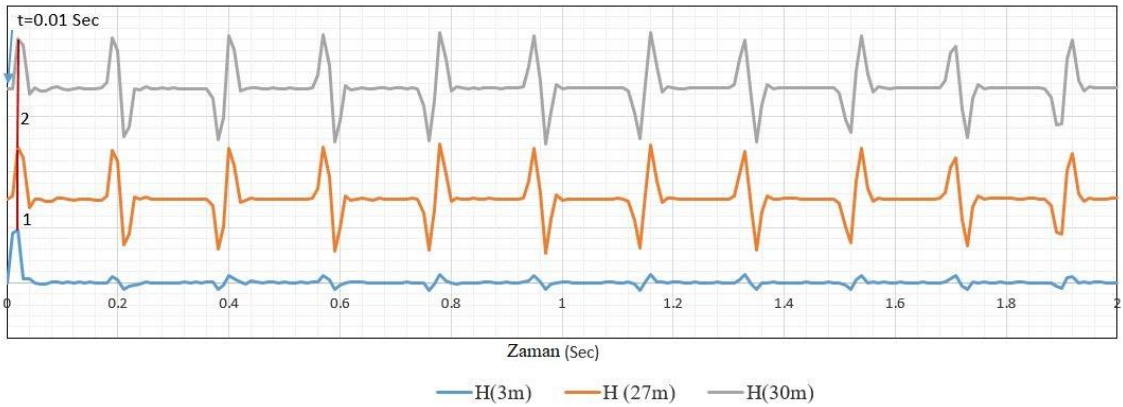
**Şekil 4.31.** Sürekli sayısal model için boyuna basınç uyarımı nedeniyle 3, 15, 30, 45, 60, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



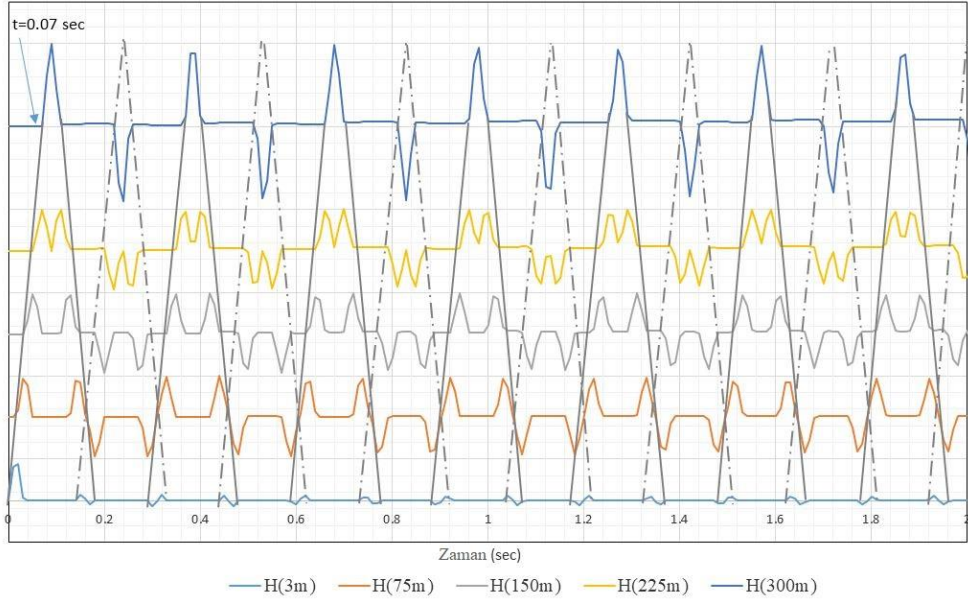
**Şekil 4.32.** Ayrık sayısal model için boyuna basınç uyarımı nedeniyle 3, 15, 30, 45, 60, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



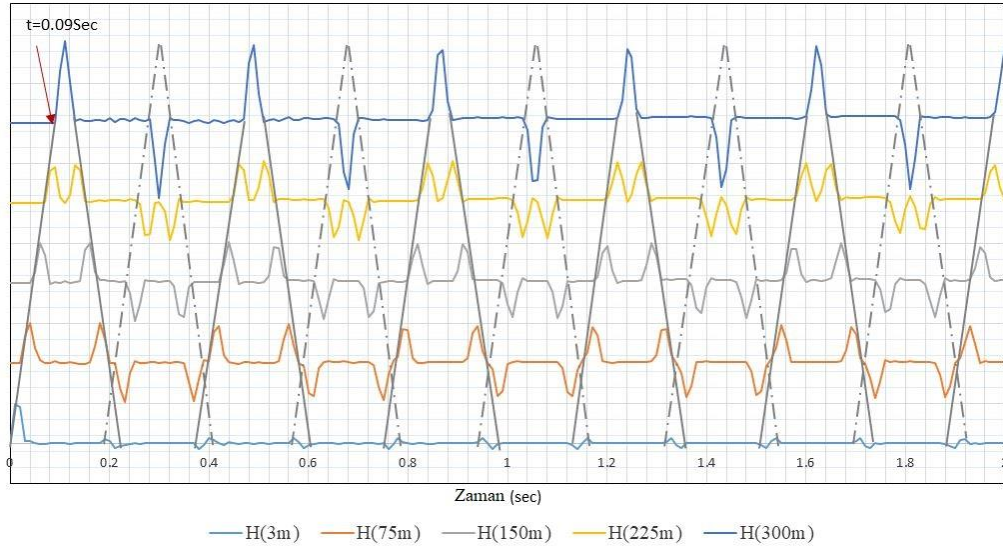
**Şekil 4.33.** Sürekli sayısal model için boyuna uyarıma bağlı olarak 3, 39 ve 42 yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



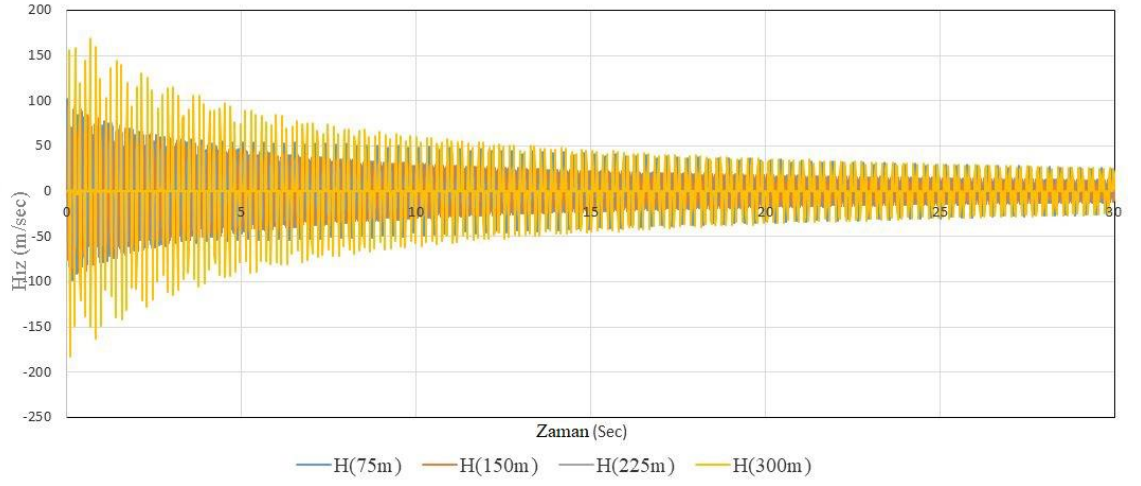
**Şekil 4.34.** Ayrık sayısal model için boyuna uyarıma bağlı olarak 3, 27 ve 30 yüksekliklerinde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



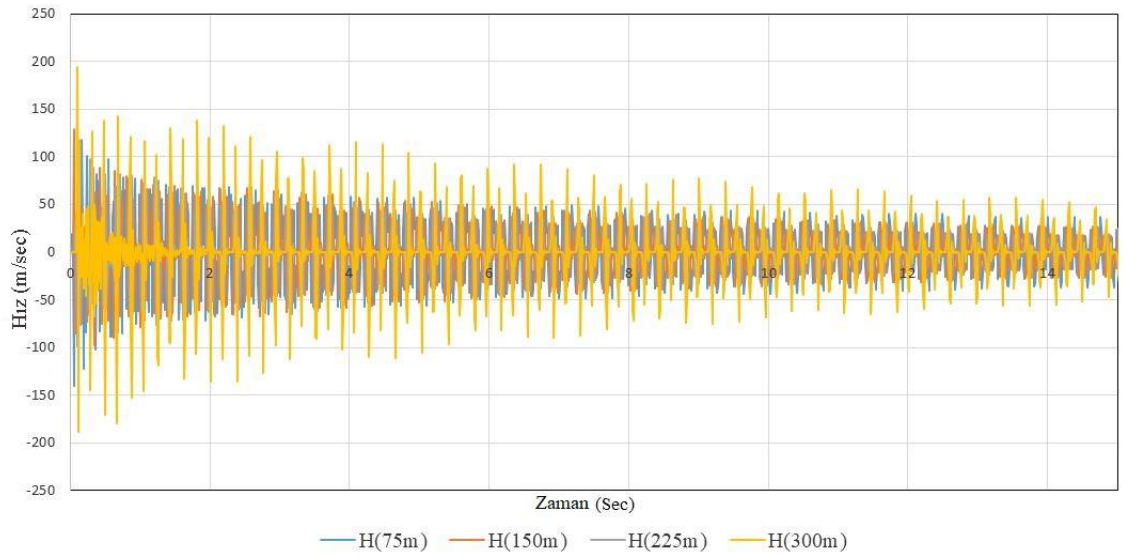
**Şekil 4.35.** Sürekli model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



**Şekil 4.36.** Ayrık model için 3, 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde dikey deformasyonun zamanla değişimi.



**Şekil 4.37.** Sürekli model için 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde boyuna hızın zamanla değişimi.



**Şekil 4.38.** Ayrık model için 75, 150, 225 ve 300 m yüksekliklerde boyuna hızın zamanla değişimi.

#### **4.2.3. Karışık zaman entegrasyon yöntemleri**

Bu çalışmada, yüksek binalardaki dalga yayılımını fiziki olarak tespit etmek için doğrusal olmayan sonlu eleman prosedürlerinde açık çözüm tekniğinin kullanılabilmesi ortaya konmuştur. Çalışma ayrıca ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerin dalga interferometrisi veya dalga ters evrişim (deconvolution) temel teorileri (Snieder ve ark. 2006) ile uyumlu olduklarını da göstermiştir. Sonuçlar, aletlerin yerleştirildiği yüksek binalardan kaydedilmiş tepki verileri üzerinde yapılan literatür çalışmaları ile de uyumludur (Nakata ve ark. 2013). Bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemeler, doğrusal olmayan analiz paketlerinin, çok sayıda öğeye sahip yüksek binaların karmaşık özelliklerini ve etkileşimleri modellemek suretiyle dalga yayılım analizini gerçekleştirmek için fırsatlar sunmaktadır. Ancak yüksek binalarda dalga yayılımını inceleyebilmek için ticari yazılımlarda yer alan direkt zaman entegrasyon yönteminin etkinliği araştırılmalıdır. "Karışık" zaman entegrasyon yöntemlerinin temel amacı, her kategorideki zaman entegrasyon yöntemlerinin temel avantajlarından yararlanmaktır. Böylece, açık çözüm yönteminden kaynaklanan çıktılarına hakim olan yüksek frekans etkisini ortadan kaldırılmaktadır. Hareket denklemleri için hem açık hem de kapalı çözüm teknikleri kullanılabilir.

#### **4.2.4. Yüksek frekans ve açık çözüm tekniği**

Yapısal mühendislikte genel olarak düşük frekanslı hareketler sözkonusudur. Bu tür bir hareket, uzun süreli ölçeğe sahip analizlerle uyumludur. Açık çözüm tekniği, yüksek frekanslı hareketlerde sahte salınımlara neden olabilmektedir. Yüksek frekanslı hareketleri ortadan kaldırmak için, hacimsel (bulk) sönüm adı verilen sönüm kullanılmaktadır. Ağ elemanının en yüksek frekansında istenmeyen titreşimlerin sönümlemesi amaçlanmaktadır. Bu olay tüm elemanlarda oluşabilir. Bu durum malzemenin kütle yoğunluğu, genişleme dalga hızı, hacimsel gerilme oranı ve ağ elemanının karakteristik yüksekliği ile ilgilidir. Hacimsel viskozitenin temel değeri, malzemenin yapısal özelliklerini etkilememesidir. Sahte yüksek frekansların neden olduğu tepkilerin ortadan kaldırılması sonuçların doğruluğunu artırmaktadır. Sahte salınımlar, araştırmacılara çeşitli zaman entegrasyon teknikleri geliştirmeleri için ilham vermiştir (Kim ve Lee 2018, Kwon ve Lee 2017, Noh ve Bathe 2013). Doğrudan

entegrasyon yönteminin seçimi önemli ölçüde soruna bağlıdır. Sonuç olarak, farklı yapı türleri için dalga yayılım analizini gerçekleştirmek için "karışık" zaman entegrasyon yöntemlerinin güvenilirliğini araştırmak için daha fazla çalışma yapılmalıdır (Grundmann ve Schuëller 2002, Kerschen 2015).

### **4.3. Yüksek Binaların Açık Çözüm Tekniği ile Tepki Analizi için Rayleigh Sönümünün İrdelenmesi**

Bu çalışmada yüksek bina taşıyıcı sistemini oluşturan hem çekirdek perde duvar hem de çerçeve sistem, tabanda enine sismik yer hareketine (RSN900-LANDERS-YER360) ve boynuna sismik yer hareketine (RSN900-LANDERS-YER-UP) maruz bırakılmaktadır. Analiz edilen modellerin dinamik davranışlarını değerlendirmek için açık çözüm tekniğini dikkate alarak Rayleigh sönümünün geçerliliğini belirlemek için Çizelge 4.9 da gösterildiği gibi, her dinamik tepkinin maksimum mutlak değerinin açık çözüm tekniği dikkate alınarak belirlenen maksimum mutlak değerine oranı hesaplanmaktadır.

Şekil 4.39 da çekirdek perde duvar için  $ID_{IMP}$  ve  $ID_{EXP}$  değerlerinin ilk kat hariç tüm ilgili katlarda yaklaşık olarak aynı değere sahip olduğunu göstermektedir. İlk katta  $ID_{IMP}$  nin değeri  $ID_{EXP}$  değerinin %82 'si olmaktadır. Şekil 4.40 dan çerçeve sistemi için, görelî kat ötelenmesinin kapalı çözümle belirlenen değerinin açık çözüm dikkate alınarak belirlenen değerden önemli ölçüde farklılık gösterdiği görülmektedir.

$ID_{IMP}$  değeri ilk katta  $ID_{EXP}$  değerinin %67'si olmaktadır. Çerçeve yüksekliğinin en üstten üçte birlik bölümü için  $ID_{IMP}$  ile  $ID_{EXP}$  arasındaki oran % 25- % 33 aralığına düşmektedir.

Buna karşılık, çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için çizilen Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 den görüldüğü gibi  $V_{EXP}$  değerleri,  $V_{IMP}$  değerlerine kıyasla nispeten büyüktür. Kesme kuvvetindeki belirgin artış, çekirdek perde duvarın toplam yüksekliğinin üst üçte birlik kısmının üst katlarında ve ayrıca çerçeve sistemde Çizelge 4.9 da sunulduğu gibi tespit edilmektedir.

Temelde  $V_{IMP}$  değeri, çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için  $V_{EXP}$  değerinin sırasıyla %54 ve %60 'ı olmaktadır. Tabandaki  $M_{IMP}$  değeri  $M_{EXP}$  değerinin %93'ü

olmaktadır.  $M_{EXP}$ , en üst kattaki  $M_{IMP}$  ile  $M_{EXP}$  arasındaki oranın çekirdek duvar için %44 ve çerçeve sistemi için %37 olduğu yükseklik boyunca önemli ölçüde artmaktadır (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). Açık çözüm tekniği dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde, yapısal tepkilerde (moment ve kesme) gözlenen büyüme, yüksek frekans değerlerinin daha yüksek modları ile çakışmaktadır. Çekirdek perde duvar ve çerçeve sistemi için Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 dan görüldüğü gibi eksenel kuvvet için muazzam büyütme oranı belirlenmiştir.  $N_{IMP}$  maksimum mutlak değeri, çekirdek duvarın ve çerçeve sisteminin tabanında sırasıyla  $N_{EXP}$  maksimum mutlak değerinin yaklaşık %29 ve %37 si kadardır.  $N_{IMP}$  ile  $N_{EXP}$  arasındaki oran, analiz edilen iki modelin yüksekliği boyunca % 23- %34 aralığına düşmektedir.

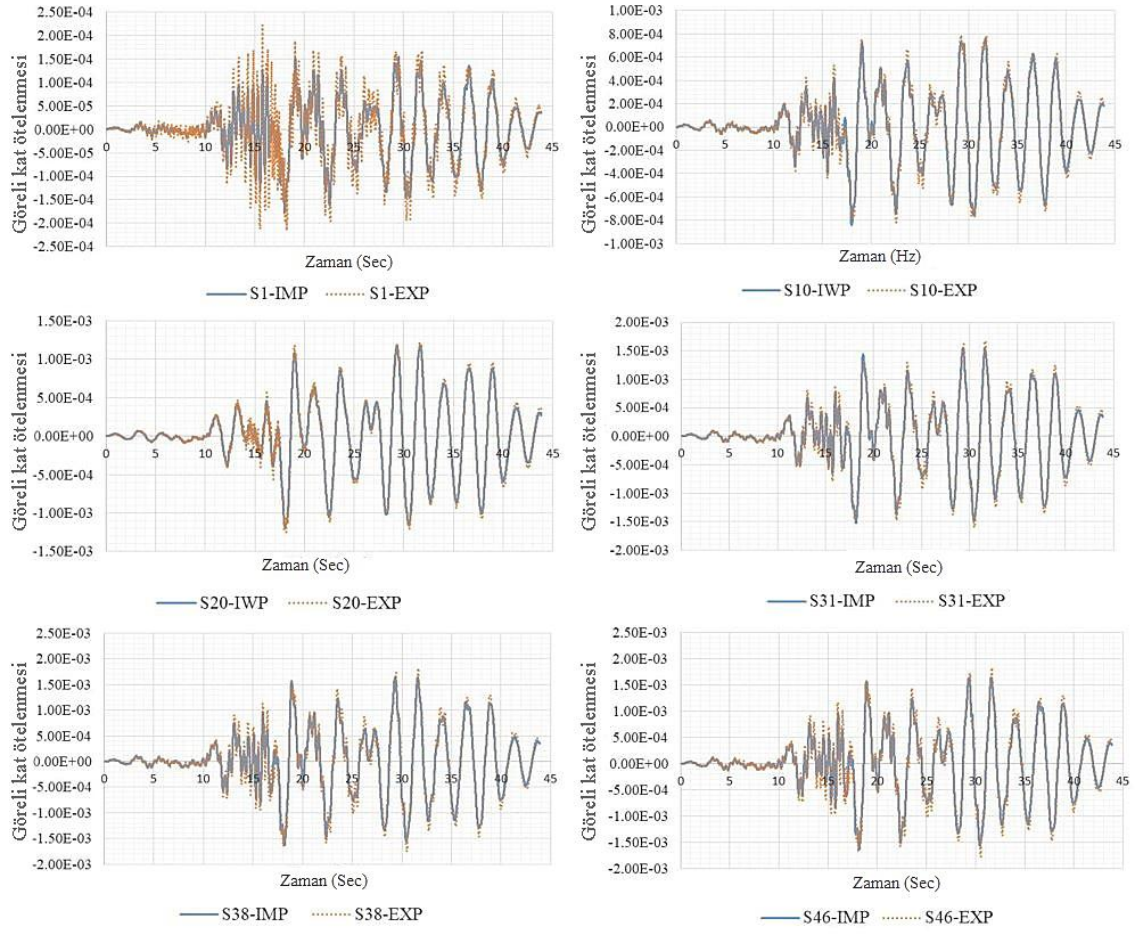
Açık çözüm tekniği dikkate alınarak eksenel kuvvette tespit edilen büyüme, boyuna/normal etki durumunda her iki modelin normal veya düşey mod şekilleriyle çakışmaktadır (bkz. Şekil 4.47 ve Şekil 4.48; Çizelge 3.4). Bu göz önüne alındığında, bildirilen büyüme şunlara atfedilebilir: (1) yüksek frekansların daha yüksek modları ile çakışan sıfır sönümleme etkisi. Bu, daha yüksek modlarla ilişkili olan tepkiyi önemli ölçüde artırabilir. (2) Sönüm değerinin, yatay yönde benimsenen değerden çok daha fazla olması gereken düşey doğrultuda belirtilmesindeki eksiklik. Bu durum sönüm etkisini arttırmak için boyuna yüklemeye karşı çıkan kütle sebebiyledir. Bu bulgulara dayanarak, klasik dinamik analiz (kapalı çözüm tekniği) ile ilgili olarak, Rayleigh sönümünün daha yüksek sönüm oranlarına sahip yüksek frekansların daha yüksek modlarını iyi değerlendirdiği sonucuna varılabilir (Şekil (3.10)-(a)). Bununla birlikte, doğal zamana bağlı stabilite talebi ve rijitlik orantılı sönümlemenin ihmal edilmesinden dolayı, klasik Rayleigh sönümü açık dinamik analiz için uygun görünmemektedir. Buradaki bulguların, açık dinamik analiz dikkate alındığında, daha yüksek titreşim modları ile birlikte artan sönüm üzerine literatür bulguları ile tutarlı olduğunu belirtmek uygun olmaktadır. Bu, bilginin atlamasız olarak elemandan elemana aktarıldığı anlamına gelmektedir. Cruz ve Miranda, 2017'de (Cruz ve Miranda 2017) geçmiş 46 depremde izlenen 24 bina için 119 sismik tepkinin sönüm oranlarını araştırmıştır. Yazarlar, çalışılan vakaların %96'sında modal sönüm oranlarının, frekansın artmasıyla yaklaşık ve doğrusal olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Burada belirtilen çalışmada, diğerleri arasında yüksek binalar da dahil olmak üzere iyi donanımlı binalardan saha izleme yanıt verilerini araştırıldı. Diğer

bir deyişle, yüksek binalar durumunda açıkça ortaya çıkan dalga yayılma olgusu (açık çözüm tekniği durumu) dikkate alınarak dinamik tepkiler incelemiştir. Rezonansa yakın olayının etkisi, hem açık hem de kapalı çözüm tekniği dikkate alınarak her iki model için katlar arası ötelenmenin yanısıra eğilme momenti, kesme kuvvetinde de gözlemlenmektedir.

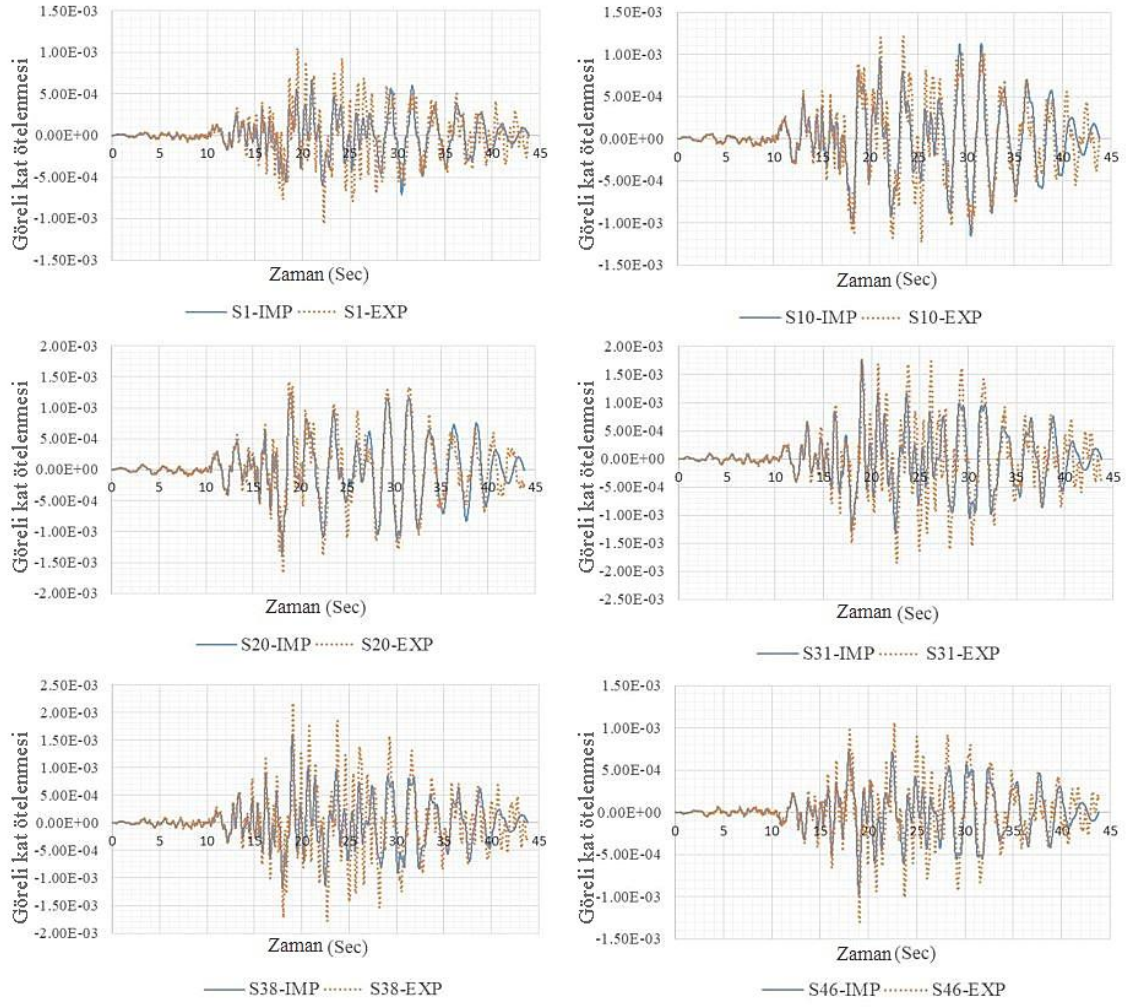
**Çizelge 4.9.** Çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için açık ve kapalı yöntemleri dikkate alarak dinamik tepkilerin maksimum mutlak değerlerine oranı.

(IMP/EXP)Max	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0.82	1.01	0.94	0.95	0.92	0.92
V	0.54	0.62	0.61	0.61	0.64	0.44
M	0.93	0.87	0.78	0.67	0.48	0.38
N	0.29	0.26	0.24	0.23	0.24	0.23
Çerçeve sistem						
ID	0.67	0.94	0.82	0.71	0.67	0.75
V	0.60	0.80	0.62	0.83	0.66	0.37
M	0.94	0.85	0.74	0.61	0.50	0.34
N	0.37	0.34	0.33	0.32	0.30	0.30

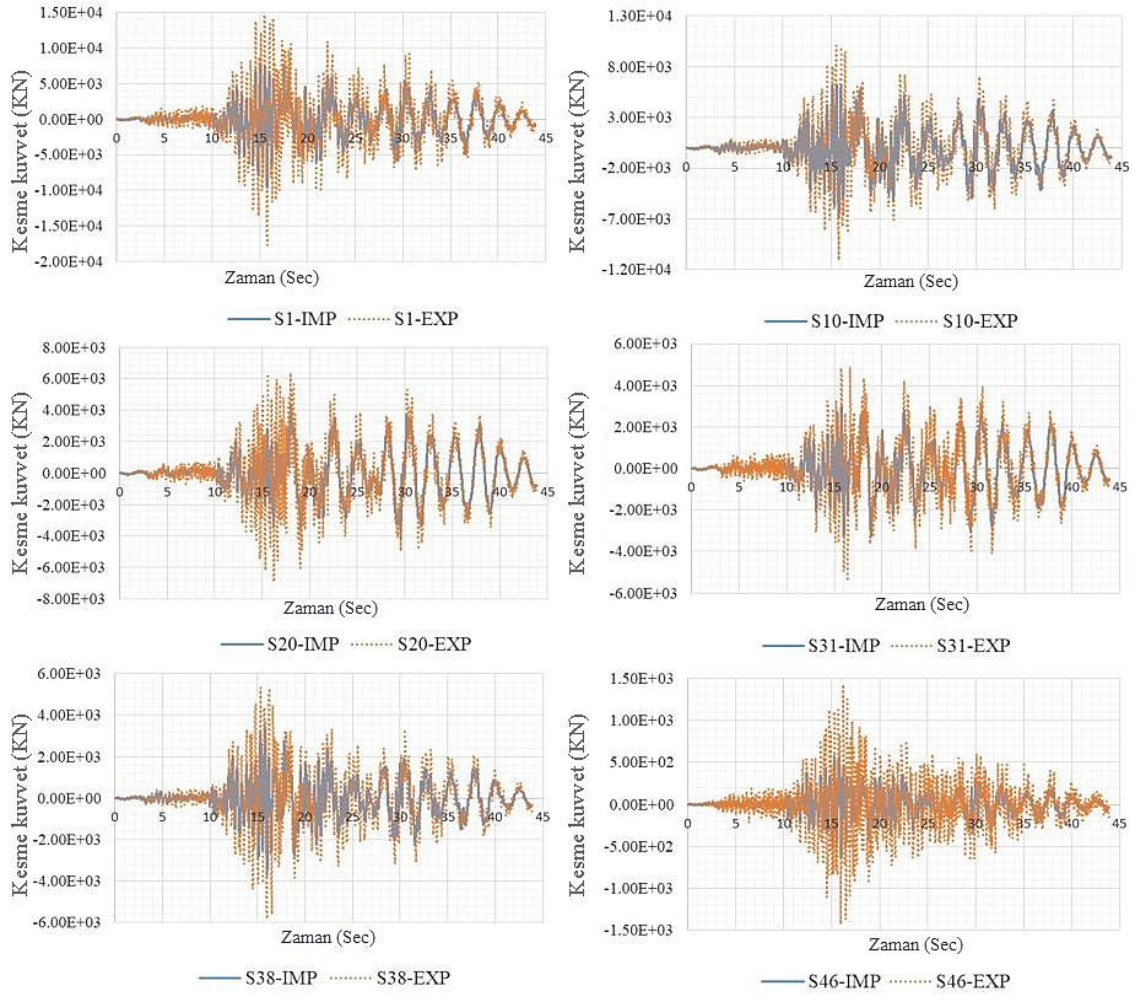




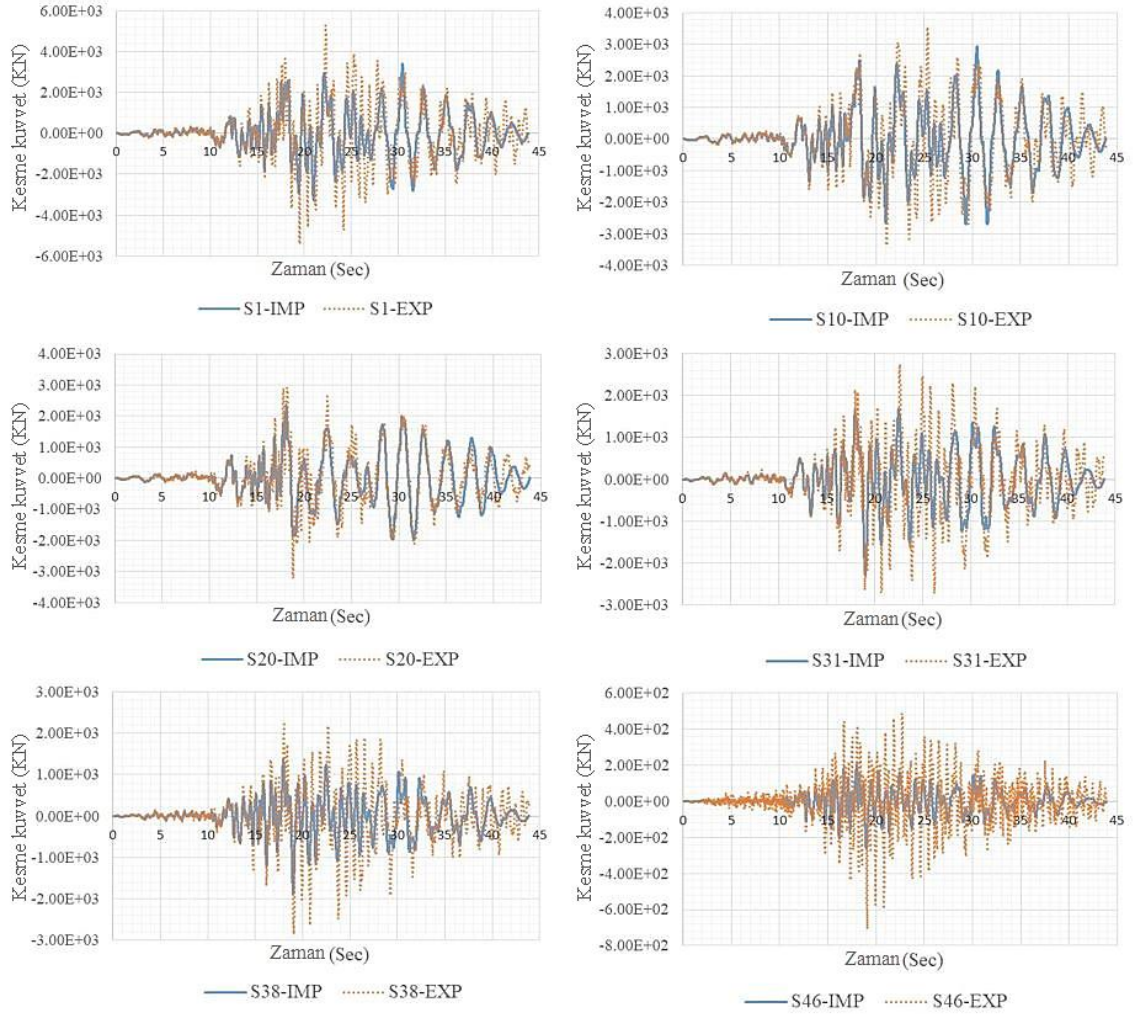
**Şekil 4.39.** Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi.



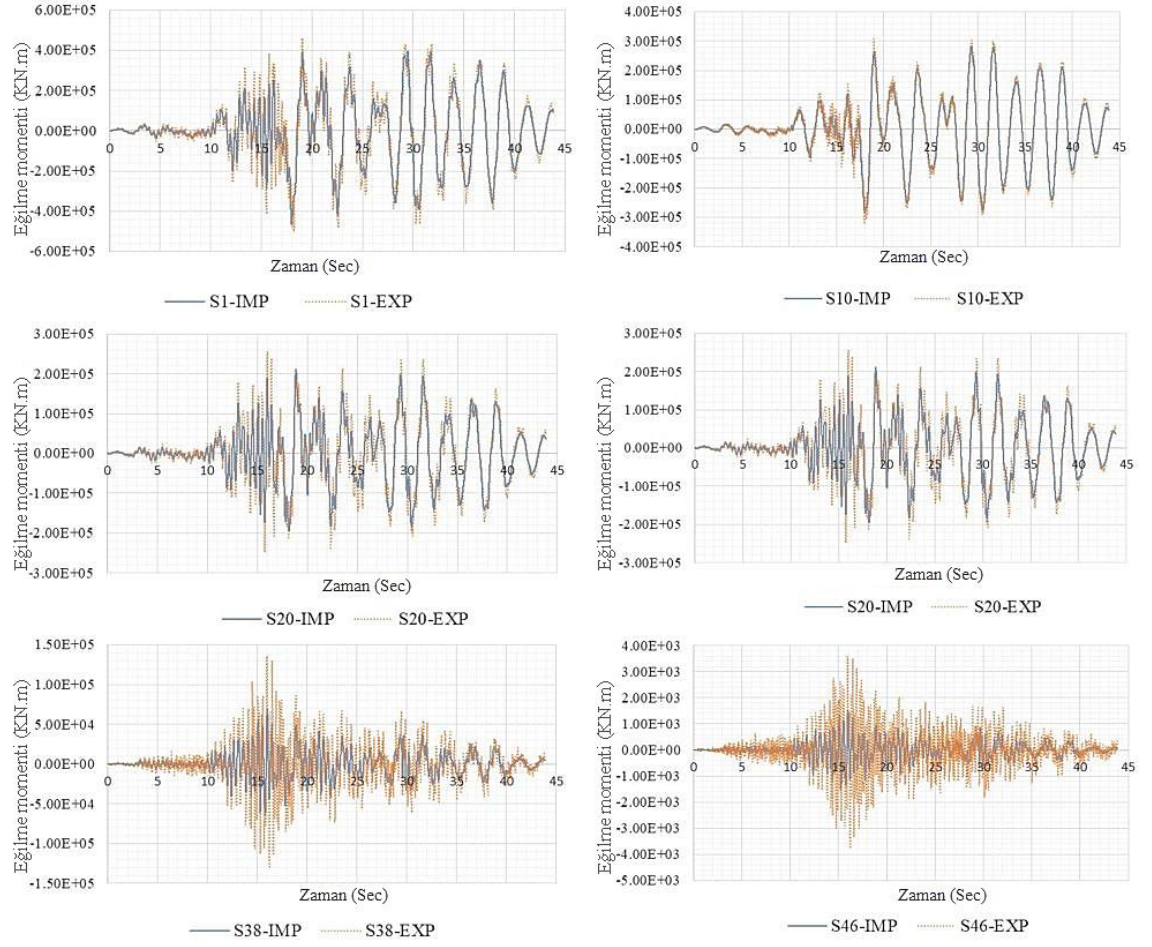
**Şekil 4.40.** Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi.



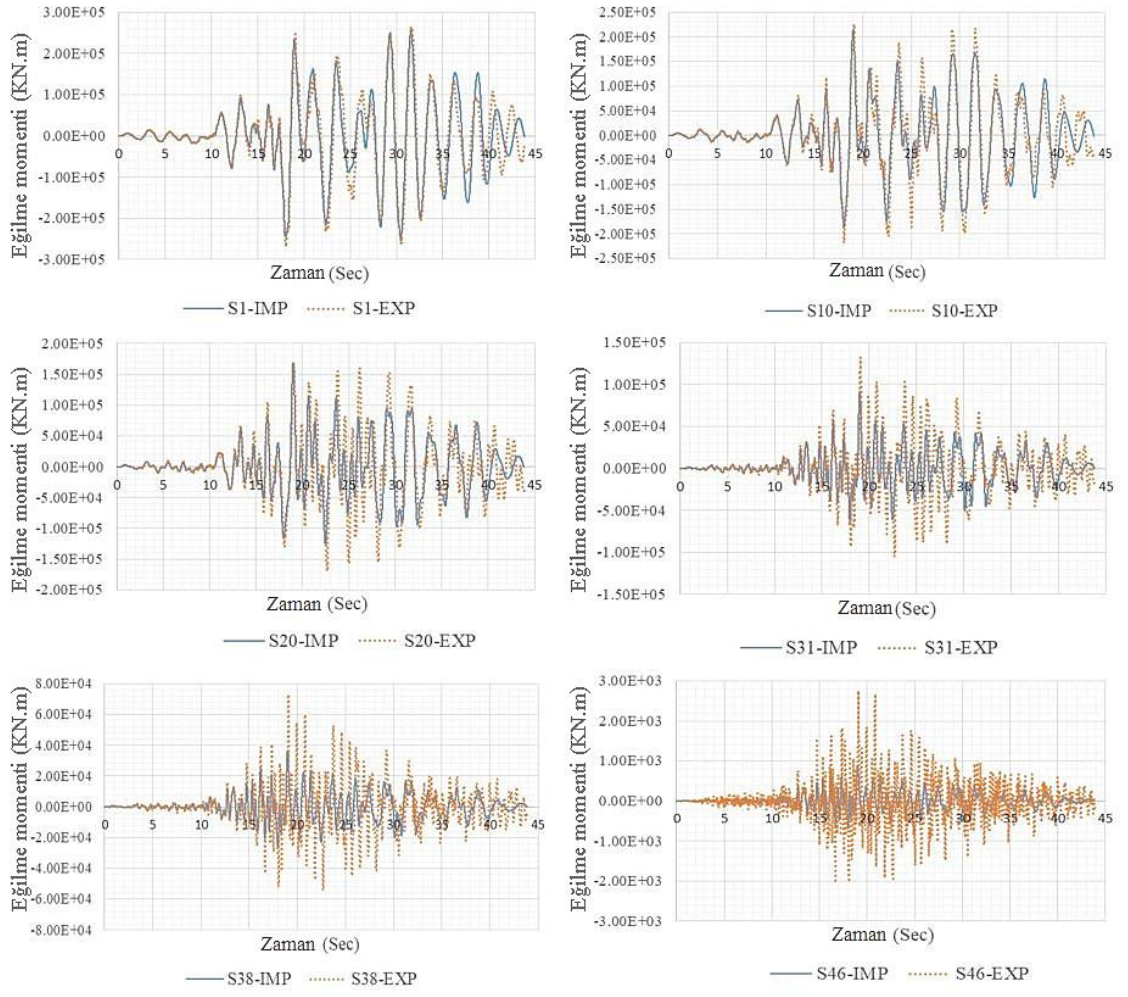
**Şekil 4.41.** Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP kesme kuvvetinin zamanla değişimi.



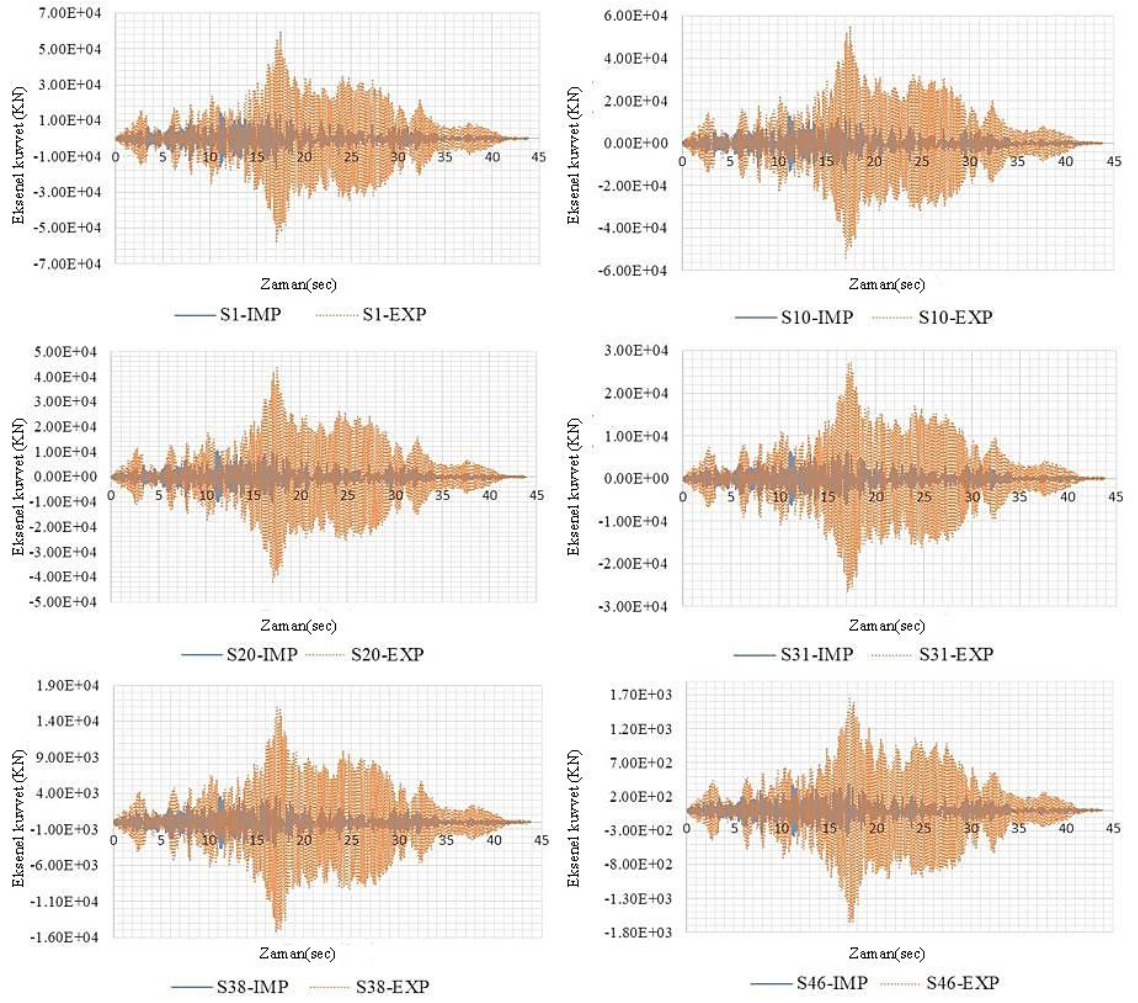
**Şekil 4.42.** Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP kesme kuvvetinin zamanla değişimi.



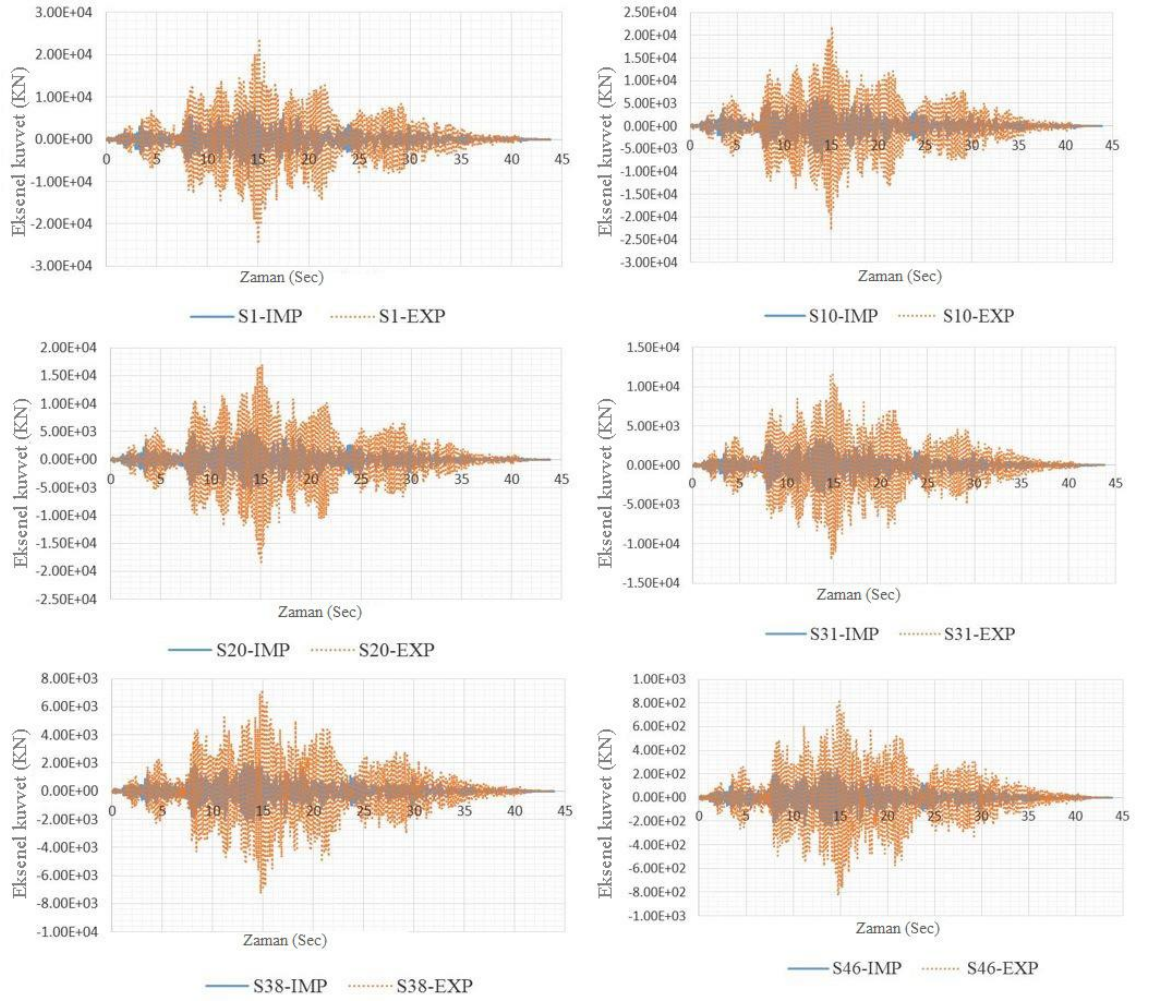
**Şekil 4.43.** Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eğilme momentinin zamanla değişimi.



**Şekil 4.44.** Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eğilme momentinin zamanla değişimi.

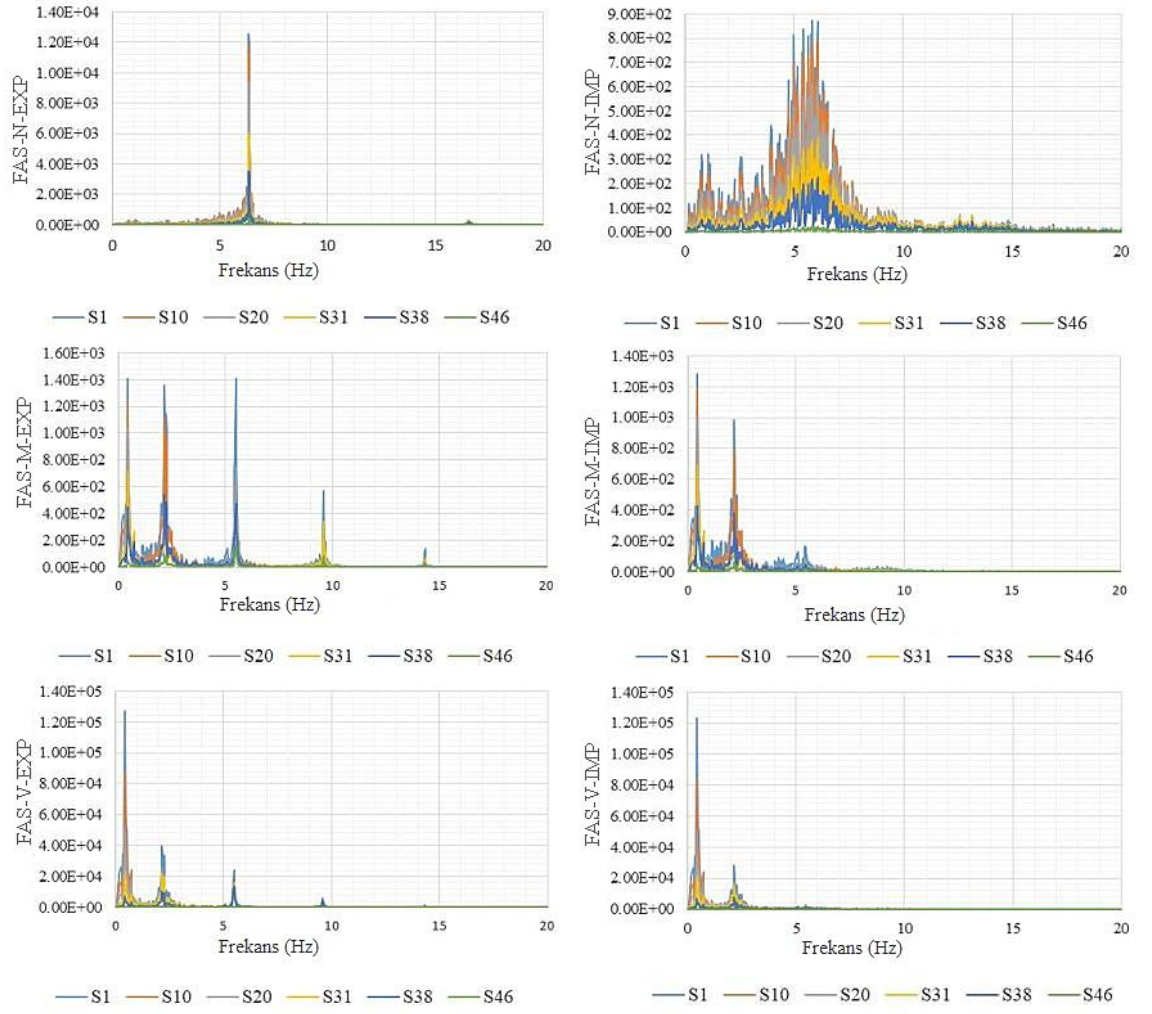


**Şekil 4.45.** Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi.

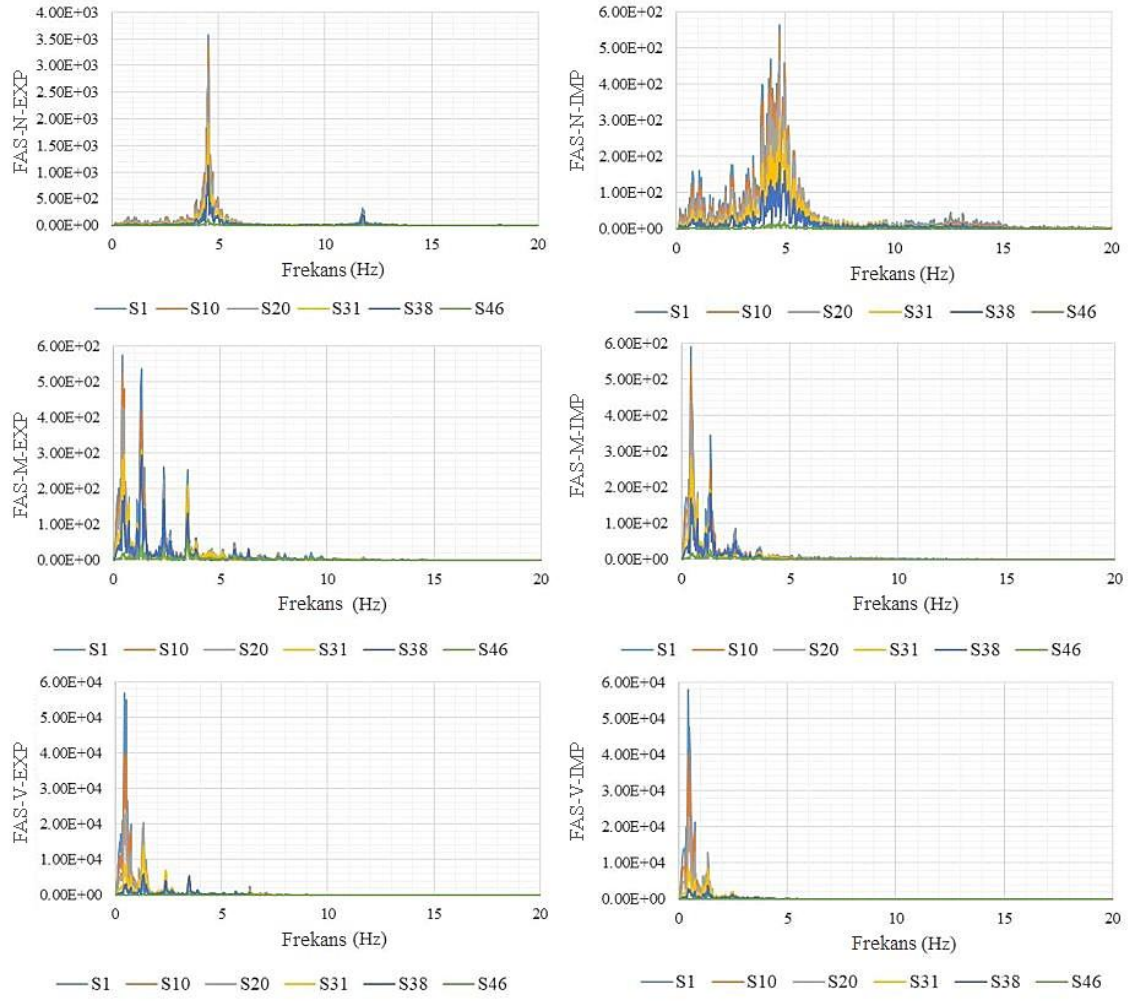


**Şekil 4.46.** Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. Katlarda EXP ve IMP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi.





**Şekil 4.47.** Çekirdek perde duvar: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvveti, kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları.



**Şekil 4.48.** Çerçeve sistem: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda EXP ve IMP eksenel kuvveti, kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları.

#### 4.4. Yüksek Binaların Dinamik Tepki Analizi için Dalga Yayılımı Yaklaşımının Sayısal Olarak İrdelenmesi

Dalga yayılım analizinin yüksek katlı binaların dinamik tepkisi üzerindeki etkisini irdelemek için, ankastre mesnetli çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem enine ve boyuna doğrultuda sismik dalgaların etkisinde kalmaktadır. Dikkate alınan yüksek binanın her iki kısmının modeli kapalı ve açık çözüm teknikleri kullanılarak analiz edilmektedir. Dalga yayılım analizini dikkate alan dinamik tepkinin maksimum mutlak değerinin, dalga yayılım analizini göz ardı ederek dinamik tepkinin maksimum mutlak değerine oranı, Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, ve Çizelge 4.12 'de gösterildiği gibi Landers1992, Northridge1994 ve Loma Prieta1989 depremlerinin veri setleri için hesaplanmaktadır. Nihai bulgular, uygulanan 3 deprem seti dikkate alınarak yapısal dinamik tepkilerin ortalama değerine dayalı olarak belirlenmektedir (Çizelge 4.13). Kesme kuvveti, eğilme momenti ve görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimleri, dikkate alınan her iki model için Landers sismik kayıtları kullanılarak sunulmaktadır. Her iki model için eksenel kuvvetlerin zamanla değişimleri, çekirdek perde duvar ve çerçeve sistemi için Loma Prieta düşey deprem kayıtları altında sunulmaktadır. Açık ve kapalı çözüm tekniklerini kullanarak analiz edilen modellerin temel frekansları algılayabildiği tespit edilmiştir (Çizelge 3.4 ve Şekil 4.49, Şekil 4.50, Şekil 4.51, ve Şekil 4.52).

Çizelge 4.13 den  $ID_{IWP}$  ve  $ID_{CWP}$  değerlerinin çekirdek perde duvar için yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.53). Bu sırada, çerçeve sistemi için katlar arası kayma, ilk katta ve çerçeve yüksekliğinin üçüncü ve dördüncü üst çeyreğinin katlarında % [3-4] aralığında kalmaktadır (Şekil 4.54). Çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem modelleri için, eğilme momenti üst katlarda % [6-7] aralığında hafifçe azalmaktadır (Şekil 4.55 ve Şekil 4.56). Benzer sonuç % [2-5] kesme kuvveti açısından da bildirilebilir (Şekil 4.57 ve Şekil 4.58). Enine sismik dalgalar altındaki diğer yapısal tepkilerin aksine, çekirdek duvar modeli için eksenel kuvvet, çekirdek duvarın en üst son çeyreğinin üst katlarında % [15-27] aralığında önemli bir değerle artmaktadır (Çizelge 4.13). Bununla birlikte, eksenel kuvvet çerçeve sisteminin yüksekliği boyunca % [2-8] aralığında hafifçe artmaktadır. Landers sismik kayıtları etkisinde çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için Şekil 4.59 ve Şekil 4.60 'ye bakılabilir.

Gözlenen artış, düşey sismik dalgalar altında çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için boyuna mod şekillerinin frekanslarında belirgin olmaktadır (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52). Son olarak, dalga yayılım analizinin dikkate alınması rezonansa yakın (beating) olayından etkilenmemektedir. Rezonansa yakın olayı, hem CWP hem de IWP modelleri için eğilme momentinde, kesme kuvvetinde ve katlar arası kaymada gözlenmektedir.

**Çizelge 4.10.** Landers enine ve boyuna dalgalar için çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

Landers	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0.96	0.97	0.97	0.99	1.00	1.00
V	0.98	0.95	0.95	0.94	0.91	0.92
M	0.95	0.94	0.98	0.90	0.91	0.98
N	0.94	0.93	0.93	0.93	0.94	0.91
Çerçeve sistem						
ID	0.92	1.01	0.93	0.97	0.88	0.94
V	0.94	1.02	0.97	1.02	0.89	1.10
M	0.95	0.95	0.94	0.90	0.89	1.11
N	1.15	1.18	1.21	1.16	1.06	1.00

**Çizelge 4.11.** Northridge enine ve boyuna dalgalar için çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

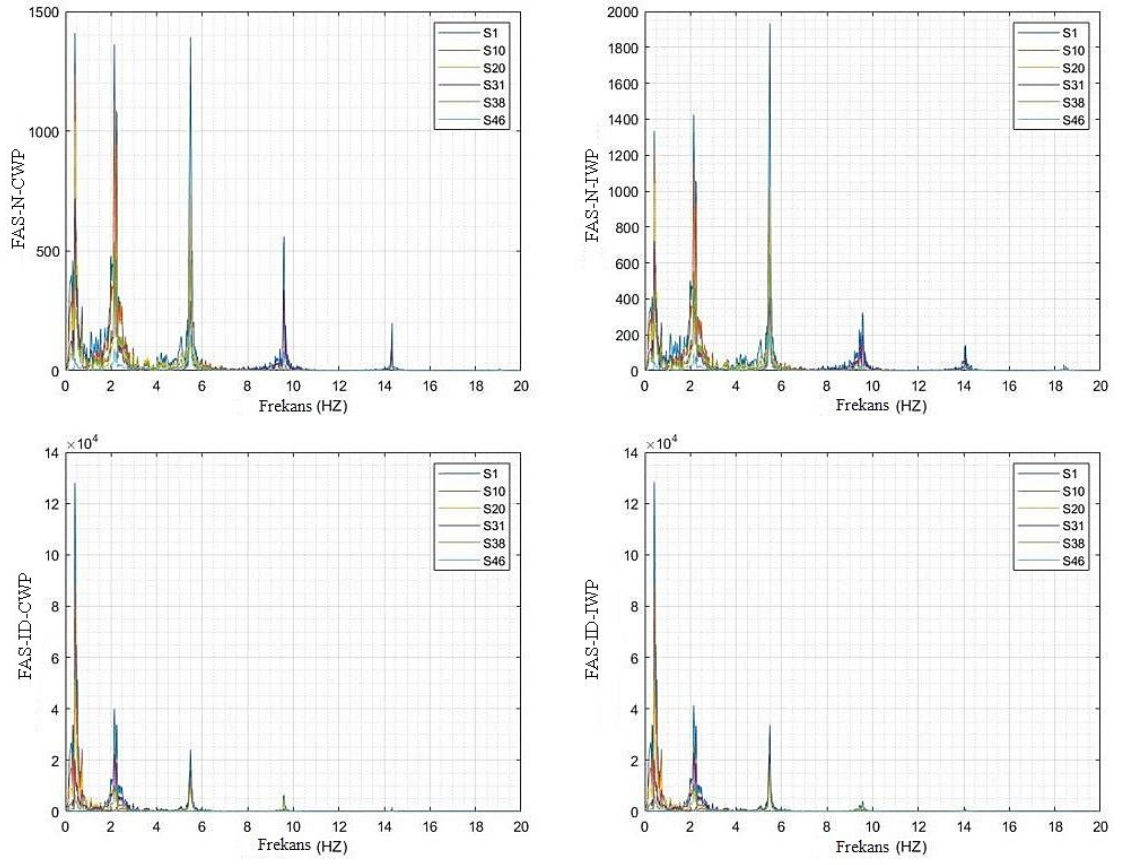
Northridge	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
V	1.00	0.96	0.98	1.02	0.98	1.15
M	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	1.02
N	1.12	1.13	1.13	1.08	1.05	1.36
Çerçeve sistem						
ID	1.00	1.02	1.00	1.00	0.97	0.99
V	1.01	1.01	1.00	1.02	0.98	0.99
M	1.01	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97
N	0.80	0.81	1.09	1.01	0.90	0.86

**Çizelge 4.12.** Loma Prieta enine ve uzunlamasına dalgalar için çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

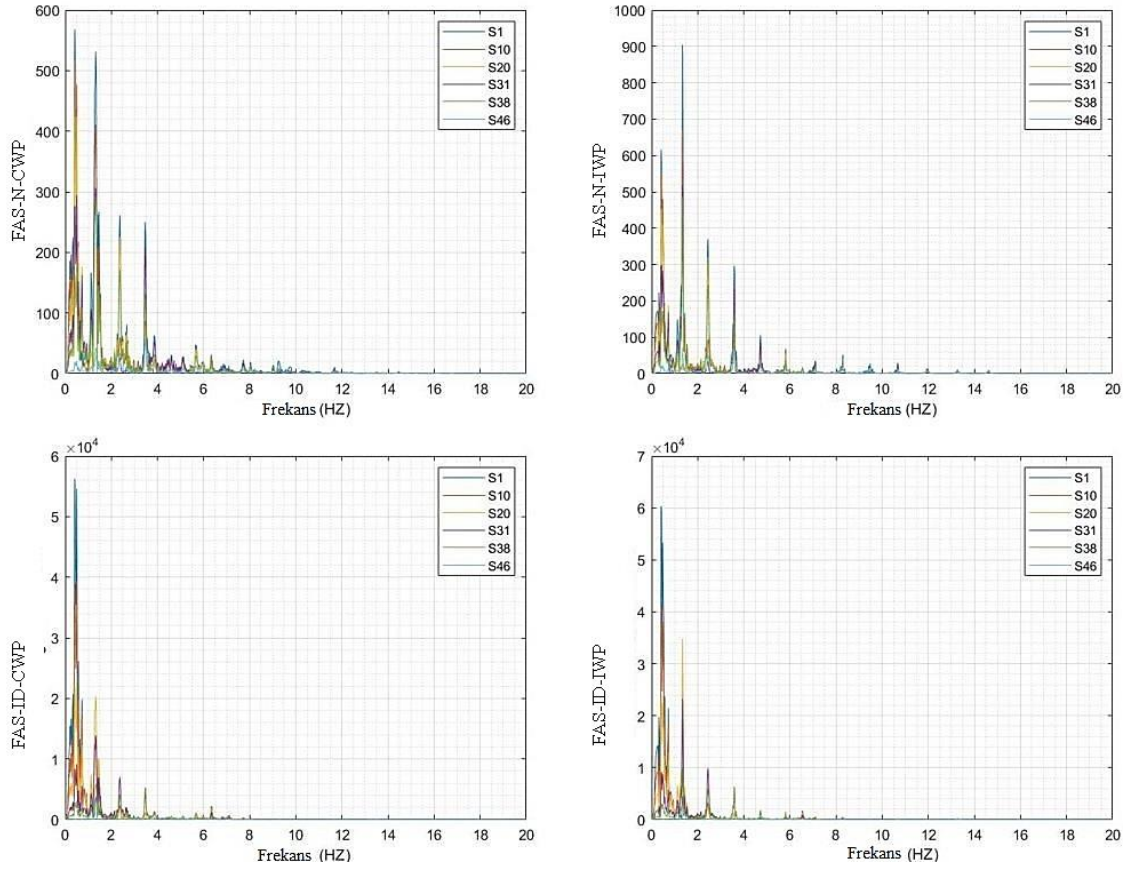
LOMA	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
V	0.91	0.98	0.98	0.98	0.96	0.80
M	0.98	1.00	0.99	1.05	0.90	0.84
N	1.10	1.04	1.04	1.29	1.45	1.56
Çerçeve sistem						
ID	0.98	1.00	0.99	0.98	1.01	0.98
V	0.98	0.98	1.02	1.01	1.03	0.97
M	0.99	0.98	1.00	0.97	0.94	0.87
N	0.94	1.01	0.93	0.92	1.09	1.23

**Çizelge 4.13.** Üç set enine ve boyuna sismik dalga altında çekirdek perde duvar ve çerçeve sistem için ortalama yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

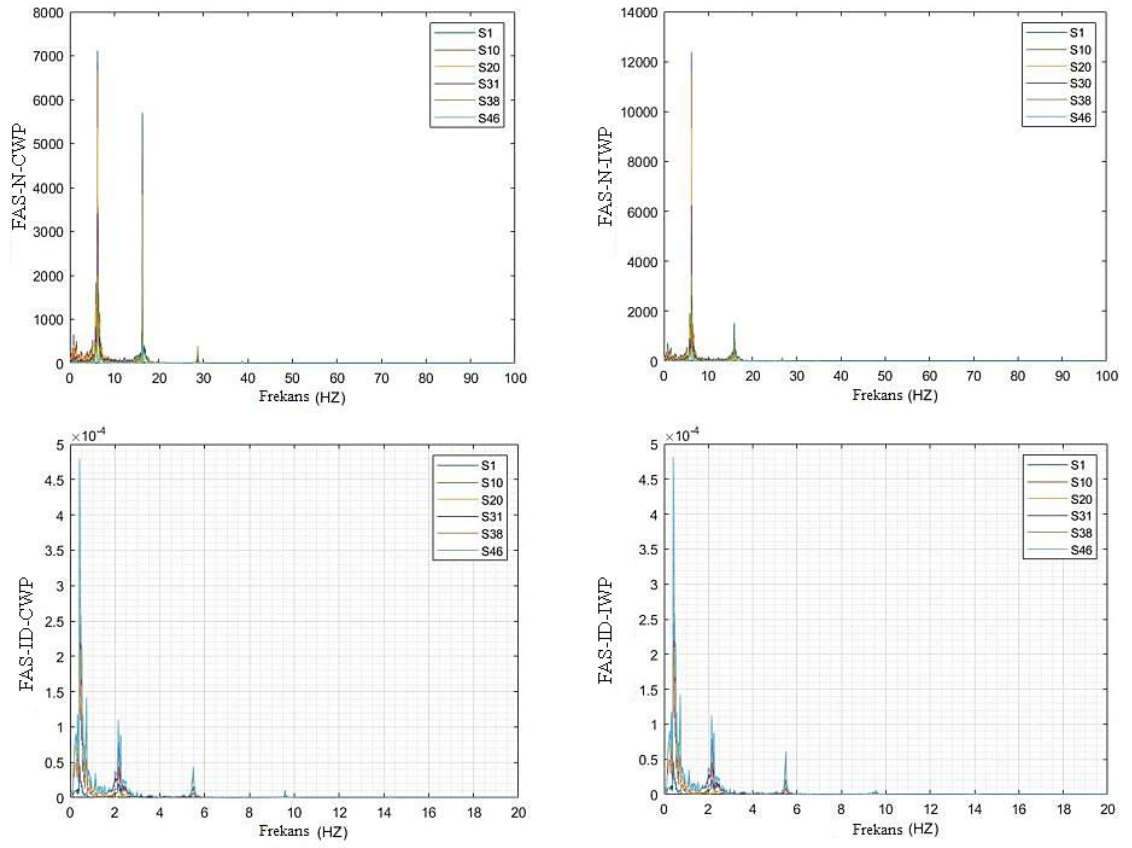
Average	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00
V	0.96	0.96	0.97	0.98	0.95	0.96
M	0.97	0.98	0.99	0.98	0.93	0.94
N	1.06	1.03	1.03	1.10	1.15	1.27
Çerçeve sistem						
ID	0.97	1.01	0.97	0.98	0.96	0.97
V	0.97	1.00	1.00	1.02	0.96	1.02
M	0.98	0.98	0.97	0.95	0.93	0.98
N	0.96	1.00	1.08	1.03	1.02	1.03



**Şekil 4.49.** Çekirdek perde duvar: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda CWP ve IWP kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları.

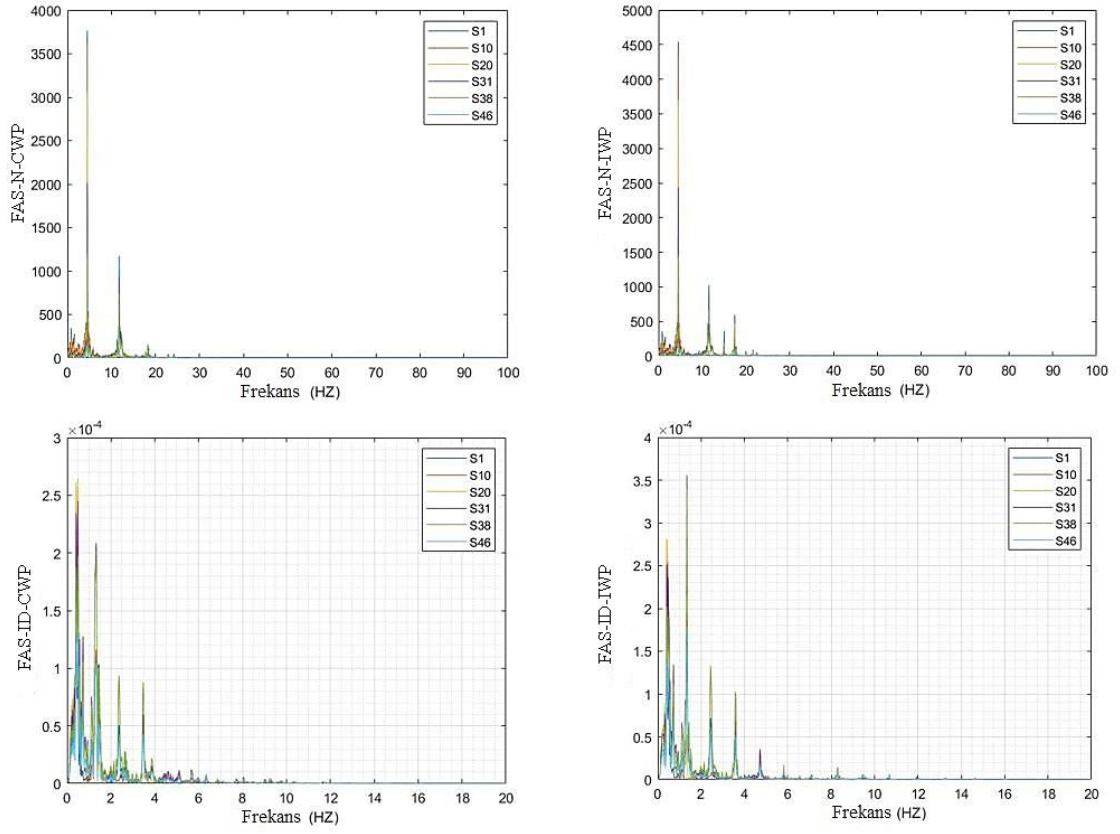


**Şekil 4.50.** Çerçeve sistem: 1., 10., 20., 31., 38. ve 46. katlarda CWP ve IWP kayma kuvveti ve eğilme momenti için Fourier genlik spektrumları.

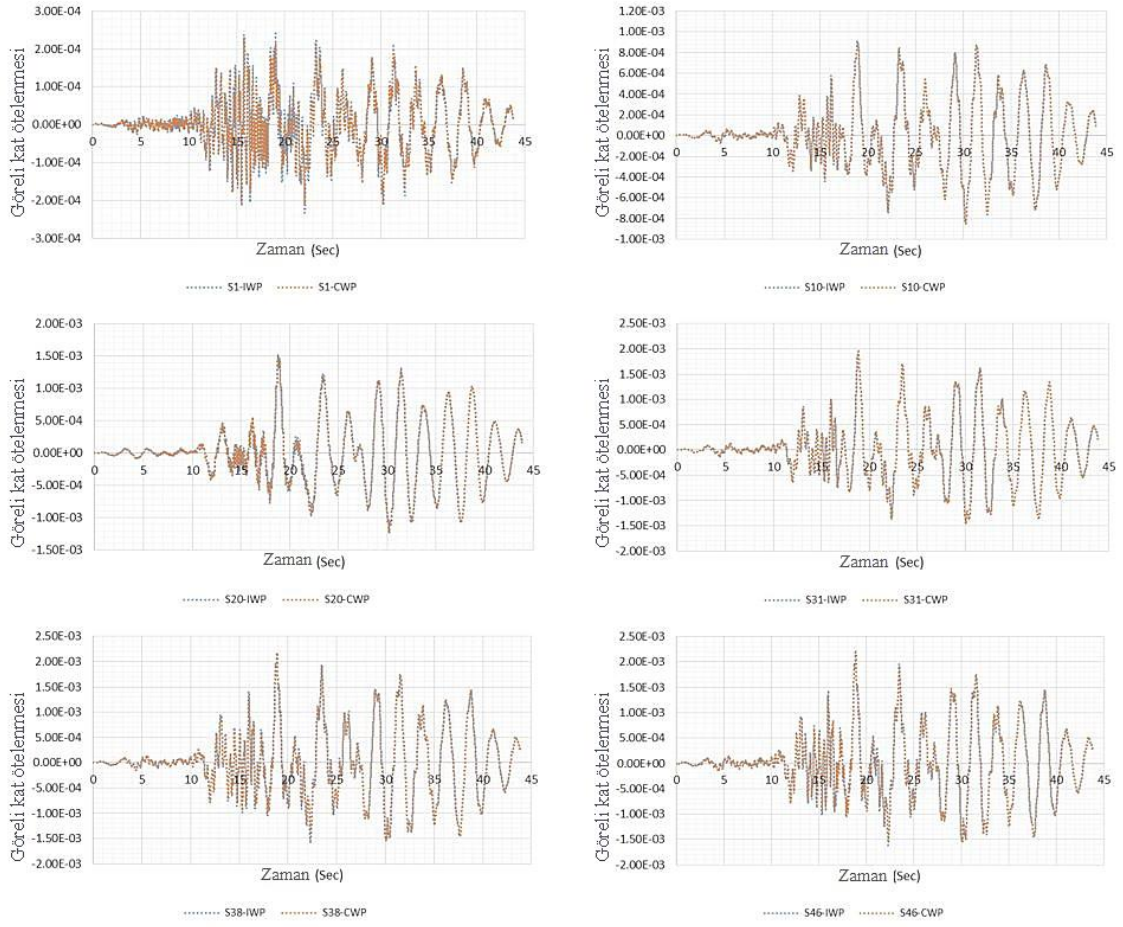


**Şekil 4.51.** Çekirdek perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvveti ve görece kat ötelenmesi için Fourier genlik spektrumları.

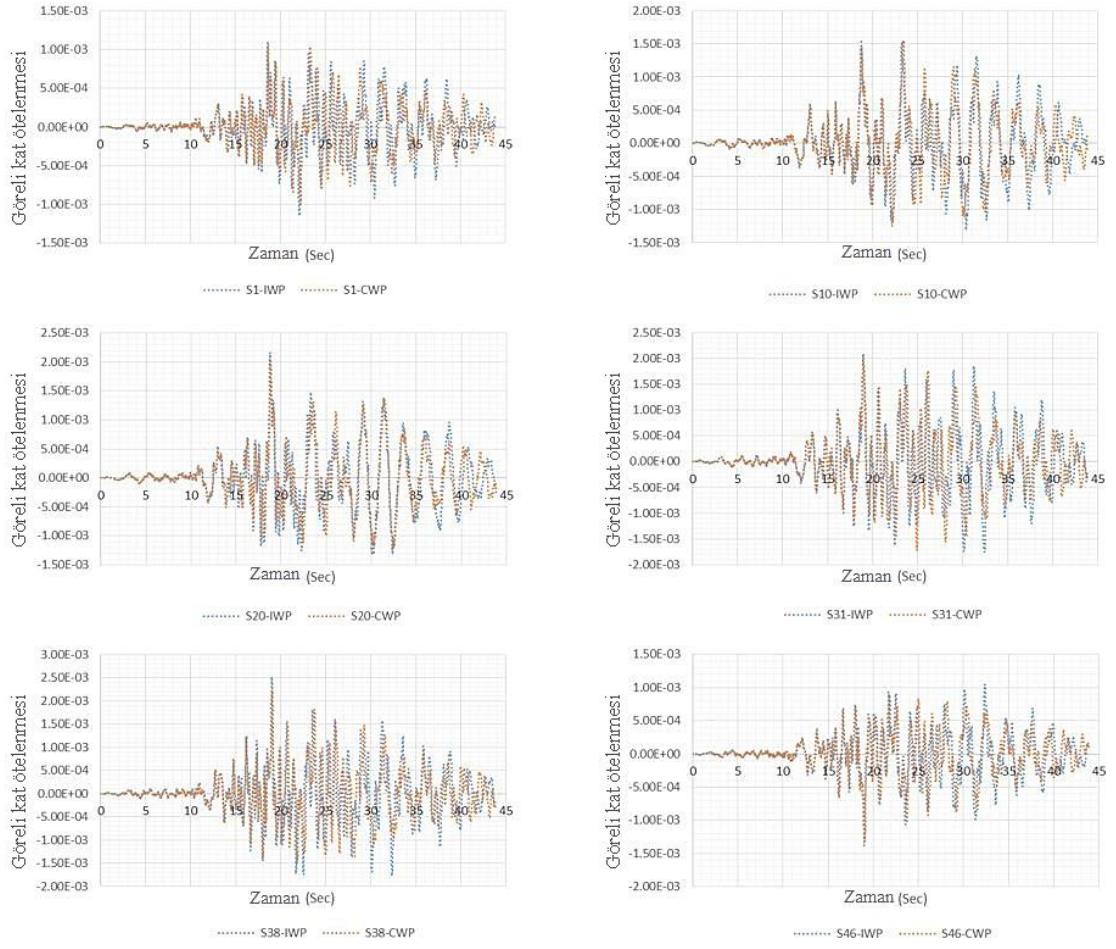




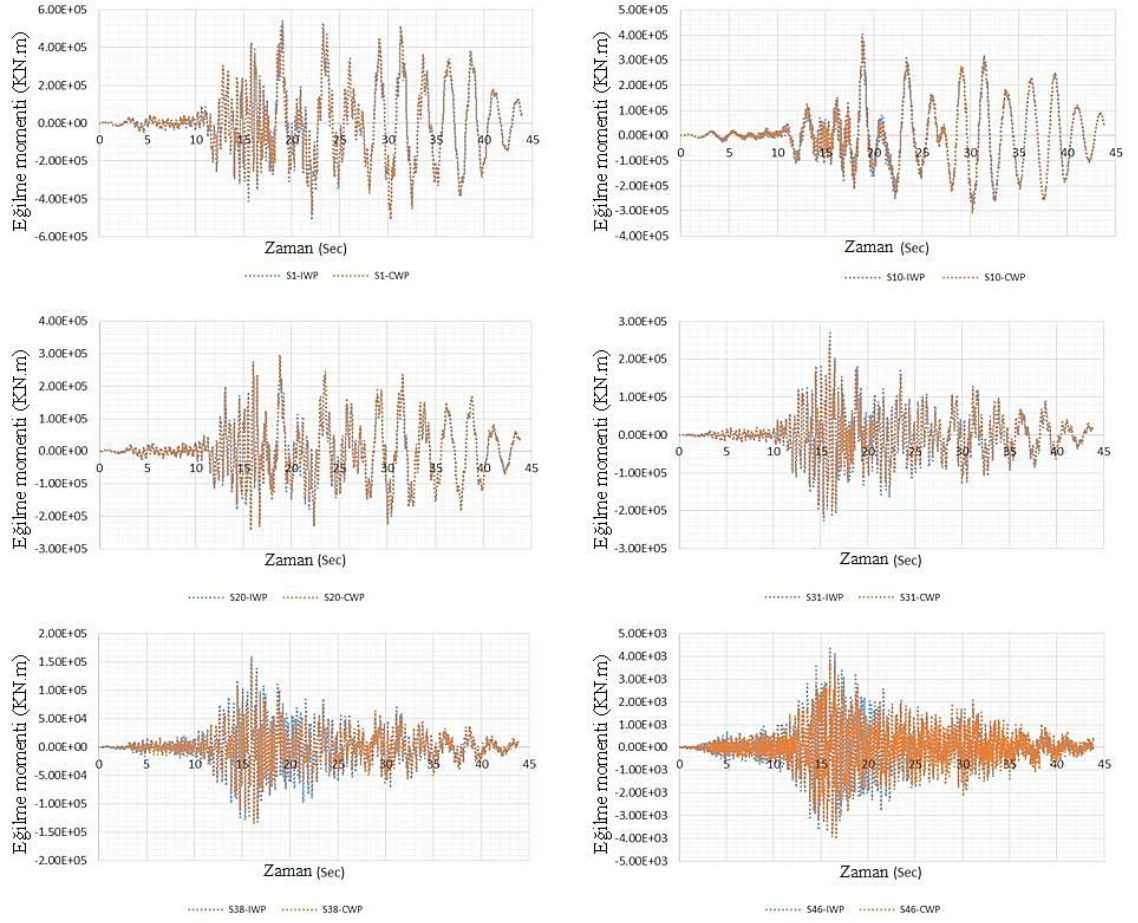
**Şekil 4.52.** Çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvveti ve görelî kat ötelenmesi için Fourier genlik spektrumları.



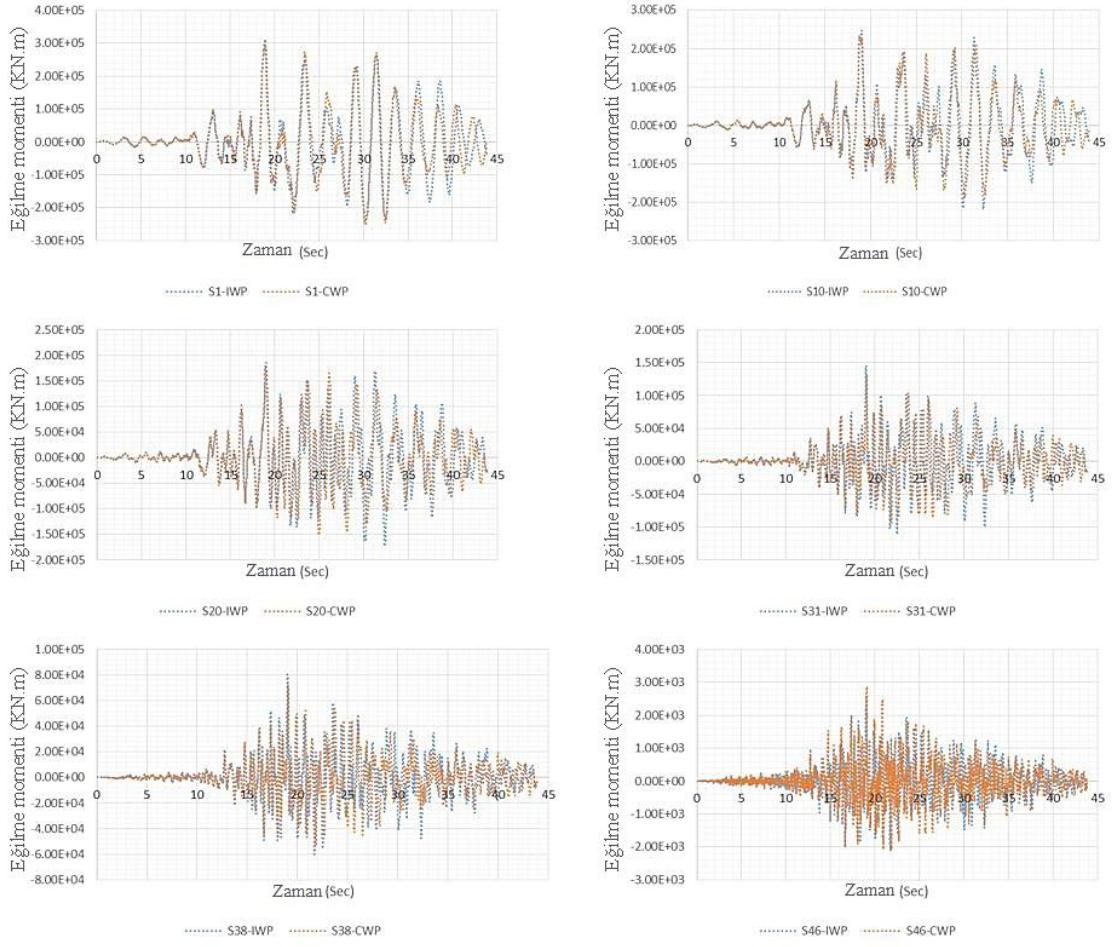
**Şekil 4.53.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çekirdek perde duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. Katlarda CWP ve IWP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi.



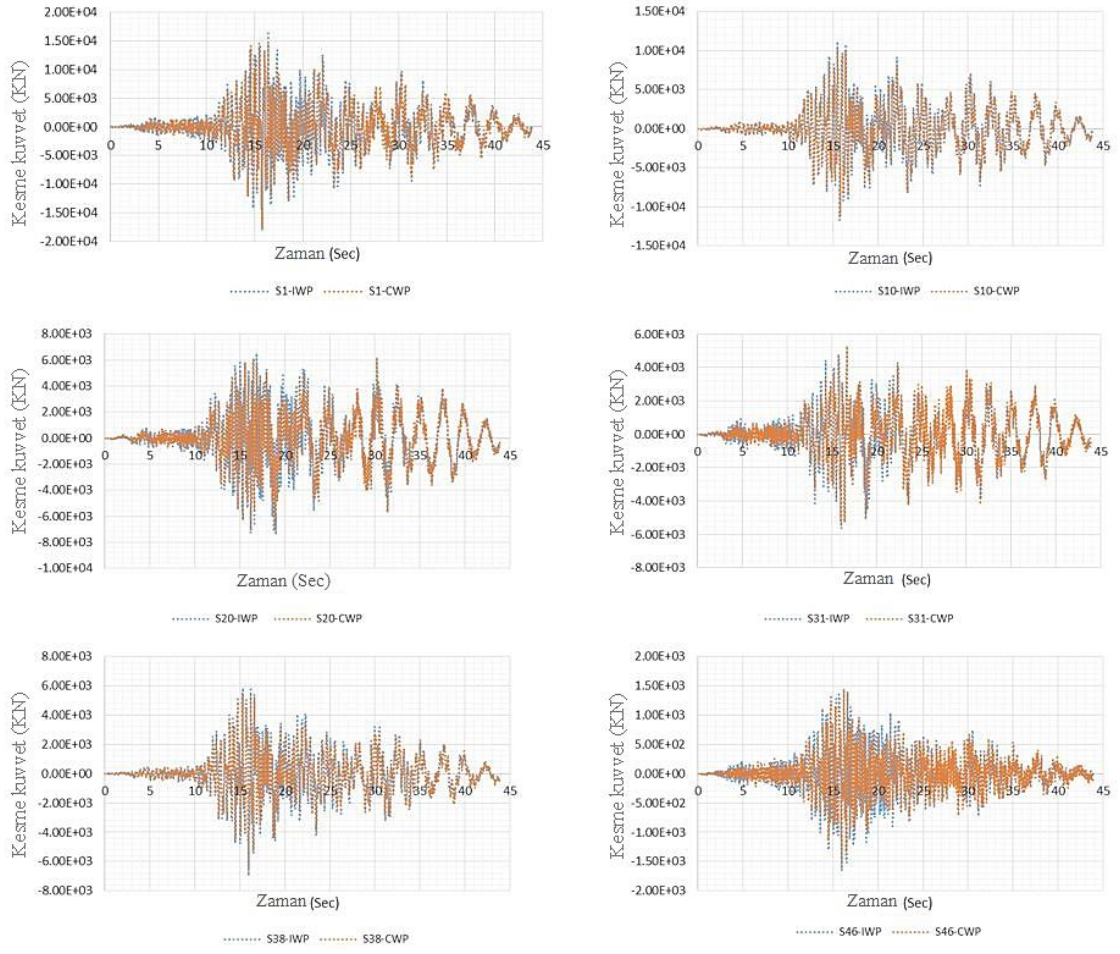
**Şekil 4.54.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP görelî kat ötelenmesinin zamanla değişimi.



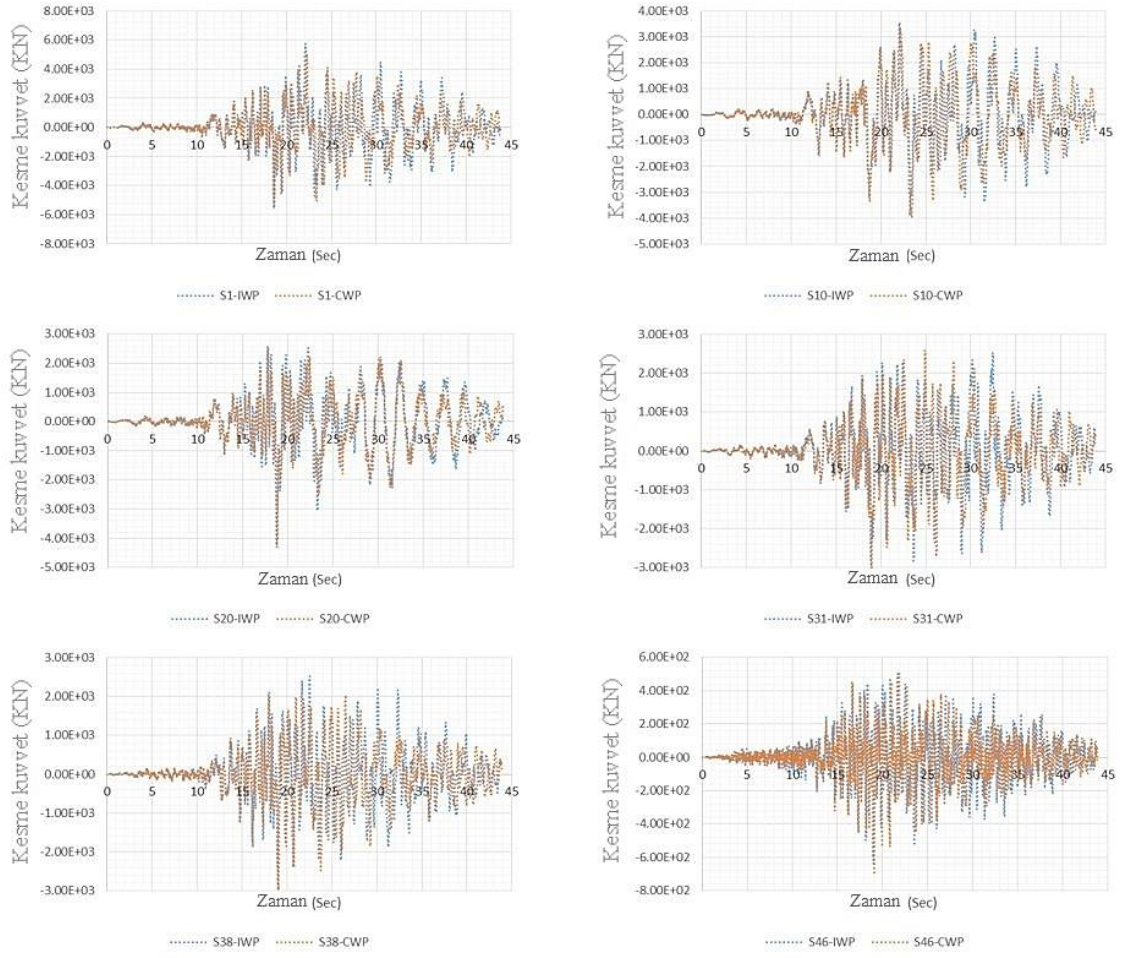
**Şekil 4.55.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çekirdek duvar: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eğilme momentinin zamanla değişimi.



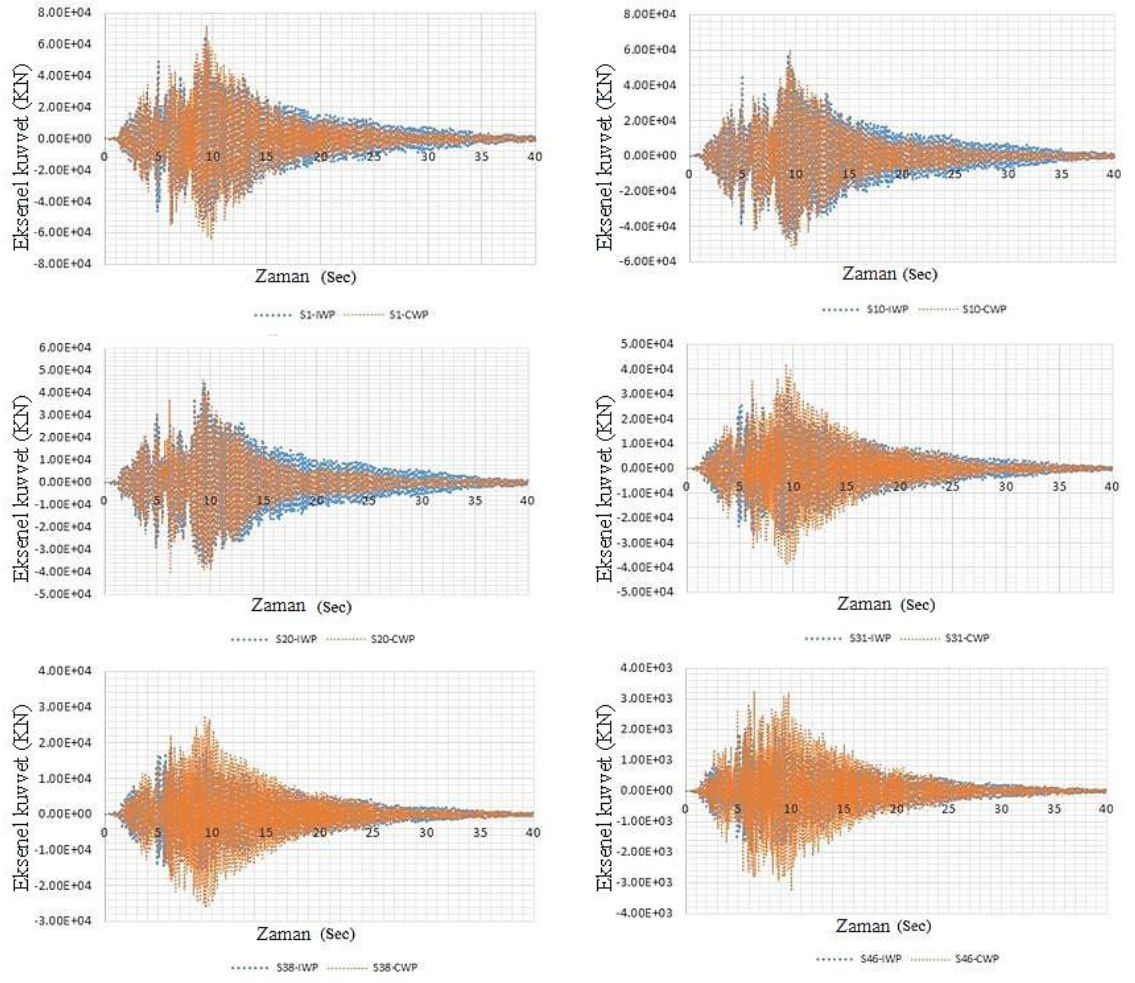
**Şekil 4.56.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1., 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eğilme momentinin zamanla değişimi.



**Şekil 4.57.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çekirdek duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP kesme kuvvetinin zamanla değişimi.

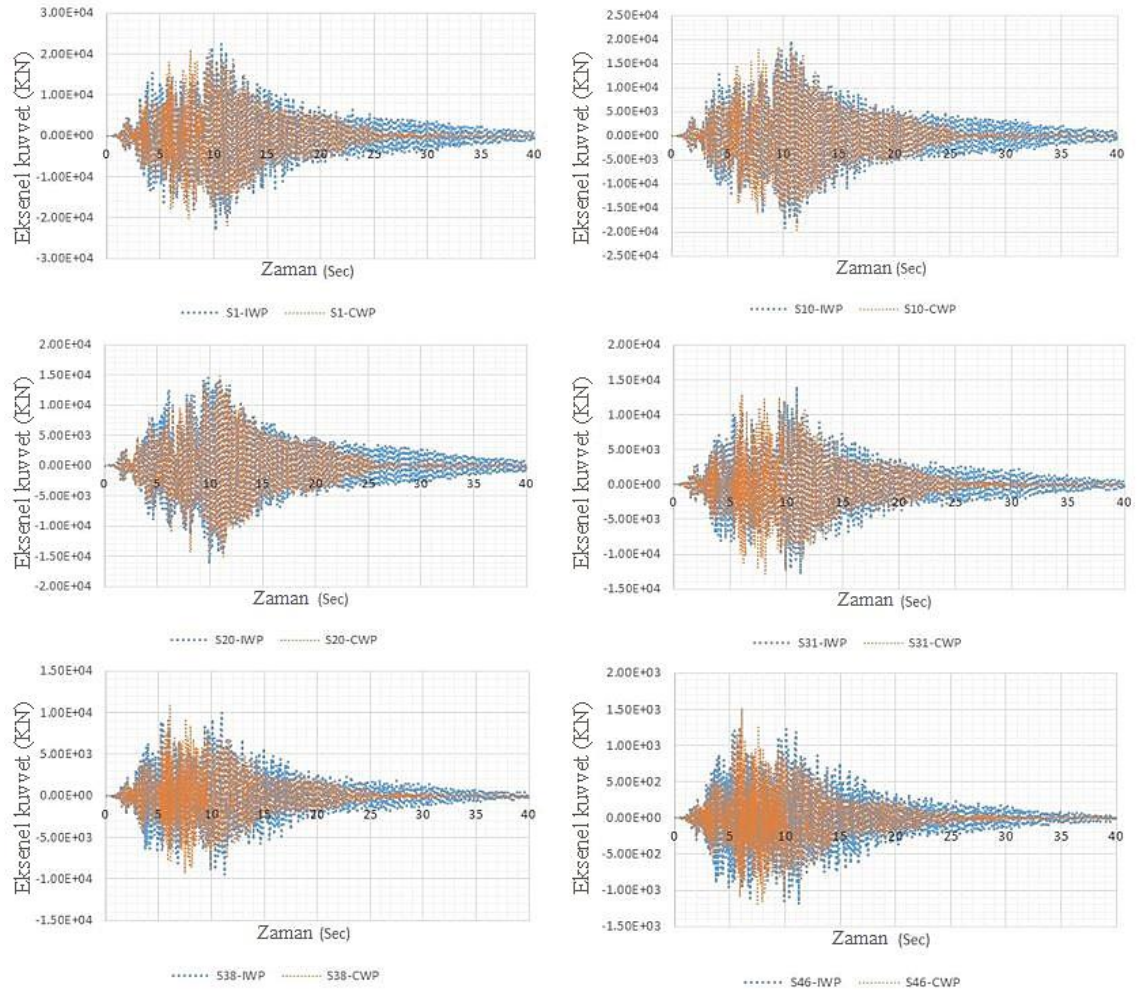


**Şekil 4.58.** Landers enine deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP kırsme kuvvetinin zamanla değışimi.



**Şekil 4.59.** Loma Prieta uzunlamasına deprem kayıtları etkisindeki çekirdek duvar: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi.





**Şekil 4.60.** Loma Prieta Longitudinal deprem kayıtları etkisindeki çerçeve sistem: 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda CWP ve IWP eksenel kuvvetinin zamanla değişimi.

## 5. SONUÇLAR

### *Sismik Yer Hareketinin Ölçeklendirilmesiyle ilgili olarak:*

Yatay yer hareketinin ölçeklendirilmesi için literatürde ve yönetmeliklerde ön görülen ölçeklendirme katsayıları irdelenmiştir. Söz konusu ölçeklendirme katsayılarının düşey bileşenin ölçeklendirilmesi için de kullanılıp kullanılmayacağı yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur. Bu bağlamda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ EUROCODE 8 zemin sınıfından bağımsız sadece yer hareketinin büyüklüğüne bağlı olarak düşey tasarım spektrumu önermektedir. ASCE7-16 ise zemin sınıflarına bağlı olarak düşey tasarım spektrumu önermektedir. Bu durumda EUROCODE 8'de öngörülen hedef tasarım spektrumunun ölçeklendirmesinde ASCE7-16 standardına göre daha düşük  $V_{SF}/H_{SF}$  oranlarıyla karşılaşılmaktadır.
- ✓ Yer hareketinin düşey bileşenin ölçeklendirme faktörünün ( $V_{SF}$ ) yatay bileşenin ölçeklendirme faktörüne ( $H_{SF}$ ) oranı, tüm zemin sınıfları için ortalama değerinden uzaklaşmaktadır. İncelenen oranın yüksek standart sapması, ortalama değeri hakkındaki belirsizliği ifade etmektedir. Dolayısıyla, yer hareketinin yatay bileşenin ölçeklendirmek için kullanılan ölçeklendirme katsayısının ( $H_{SF}$ ), düşey bileşenin ölçeklendirilmesi için de aynen kullanılmasının uygun olmadığı belirtilebilir.
- ✓ Depremin büyüklüğünün düşey bileşenin ölçeklendirilme katsayısının yatay bileşenin ölçeklendirilme katsayısına oranı ( $V_{SF}/H_{SF}$ ) üzerinde güçlü bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir.
- ✓ Joyner-Boore mesafesi ( $R_{JB}$ ) artıkça, düşey bileşenin ölçeklendirilme katsayısının yatay bileşenin ölçeklendirilme katsayısına oranında ( $V_{SF}/H_{SF}$ ) bir artış gözlenmiştir.
- ✓ Düşey bileşenin ölçeklendirilme katsayısının yatay bileşenin ölçeklendirilme katsayısına oranı ( $V_{SF}/H_{SF}$ ), yüksek değerlerine ve aşırı değişime C ve D zemin sınıflarında ulaşmaktadır.
- ✓ Düşey bileşenin ölçeklendirilme katsayısının yatay bileşenin ölçeklendirilme katsayısına oranı ( $V_{SF}/H_{SF}$ ) ile maksimum yer ivmesinin düşey bileşenin yatay bileşenine oranı ( $V/H$ )<sub>PGA</sub> arasında ters bir ilişki gözlenmiştir. Söz konusu

$(V/H)_{PGA}$  oranı zemin sınıfına bağı olarak istatistiksel bir çalışma sonucunda bir (F) faktörü elde edilmiştir. Bu (F) faktörü de yatay yer hareketi ölçeklendirme katsayısı ( $H_{SF}$ ) ile çarpılarak düşey bileşenin ölçeklendirme katsayısı ( $V_{SF}$ ) belirlenmiştir. Böylece düşey bileşenin ölçeklendirmesinde kullanılacak olan bir bağıntı önerilmiştir.

### ***Yüksek Yapılarda Dalga Yayılmasının Sayısal Olarak İncelenmesiyle ilgili olarak:***

Dalganın yüksek binaların tabanından tepe noktasına kadar yayılmasını fiziki olarak ortaya koyabilmek için sayısal modeller oluşturmuştur. Bu bağlamda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- a. Bilindiği gibi elemanlarda ilerleyen dalgalar boyuna ve enine dalgalar olarak iki ana guruba ayrılabilir. Bu dalgaların hızları da malzeme özelliklerine bağı olarak değişmekle birlikte boyuna dalgaların hızı kayma dalgasından daha yüksektir. Oluşturulan modellerde boyuna basınç dalgaları süreklilik özelliklerine bağı olarak eşzamanlı olarak kısmen ilerleyen, kısmen yansıyan dalgalar üretmiştir. Söz konusu dalgalar için tepki süresi gecikmesi, iletilen dalgalarda çoğaltma, dalgaların negatif polarizasyon ile yansması, pozitif polarizasyon ile dalgaların iletimi, dalgaların tepe noktasının kayması ve incelenen modellerin serbest mesnet ucunda iletilen ve yansıyan dalgaların büyüklüğü gibi parametrelerin değişimi sayısal modeller üzerinde ortaya konmuştur.
- b. Faz hızı nedeniyle, deformasyon tepkisinin oluşması ile ilerleyen dalganın varışı çakışmaktadır. Deformasyon dalgasının belirli bir yükseklik seviyesine ulaşması ve etkili olabilmesi için yeterli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle, belirli bir yükseklikteki deformasyon tepkisi, deformasyon dalgasının ilgi seviyesine ulaşması ve onu uyarması için yeterli bir süre geçene kadar çok azdır.
- c. Çalışmada sönümün dikkate alınmadığı durumda, düşey doğrultudaki kütle katkısı nedeniyle basınç dalgası hızının zamanla zayıfladığı görülmüştür. Bu sonuç, yatay doğrultu için benimsenen değerlerden farklı olabileceği düşüncesi ile düşey doğrultu için de sönümün ayrıca incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

### ***Yüksek Binaların Açık Dinamik Tepki Analizi için Rayleigh Sönümlemesinin Sayısal Tartışması***

Bilindiği gibi Rayleigh sönümü kütle ve rijitliğin belirli katsayılarla çarpılması suretiyle belirlenmektedir. Dalga yayılımının analizlerde dikkate alınması durumunda bitişik elemanlarda gerilme ve şekil değiştirmelerin süreksizlik olmadan aktarılması gerekmektedir. Bu durumda açık çözüm tekniğinin kullanılması gerekli olmaktadır. Bu çözüm tekniği kullanıldığında ise koşullu kararlı olabilmesi için Rayleigh sönümündeki rijitlik teriminin ihmal edilmesi önerilmektedir. Sönümde rijitlik teriminin ihmal edilmesi durumunda ise ileri modlarda sönüm sıfıra yaklaştığında çerçeve sisteminin görelî kat ötelenmesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu arada, çekirdek perde duvarın görelî kat ötelenmesi üzerinde ise küçük bir etki oluşturmaktadır.

Rayleigh sönümündeki rijitlik kısmının ihmal edilmesinin dinamik tepkiler üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla seçilen yapı modellerinin rijitlik kısmının dikkate alındığı kapalı ve ihmal edildiği açık çözüm teknikleriyle analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucuna göre rijitlik kısmının ihmal edilmesi durumunda kesme kuvveti ve eğilme momentinin değerleri, dikkate alınan modellerin üstten üçte birlik kısmındaki katlarda önemli ölçüde artmaktadır. En önemli artış ise eksenel kuvvet değerinde görülmüştür.

### ***Yüksek Binaların Dinamik Tepkisinde Dalga Yayılımın Etkisiyle İlgili Olarak***

Dalga yayılımının dikkate alınmasının ya da ihmal edilmesinin yüksek binaların dinamik tepkilerindeki etkilerini görebilmek amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

- a. Görelî kat ötelemesinin, yüksek binaların tasarımında çok önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Yüksek yapılar için dalga yayılımı dikkate alındığında, görelî kat ötelemesi, kesme kuvveti ve eğilme momentinde az da olsa bir azalma meydana gelmektedir. Bu durumda, yüksek binaların daha doğru dinamik tepkisini elde etmek için dalga yayılımının dikkate alınmasının daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması açısından uygun olacağı belirtilebilir.

- b. Dalga yayılmasının dikkate alınması durumunda eksenel kuvvet, özellikle çekirdek perde duvarın üst üçüncü çeyreğindeki katlarda önemli ölçüde artmaktadır. Çerçeve sisteminin yüksekliği boyunca eksenel kuvvette az bir artış tespit edilmiştir. Bu nedenle, klasik dinamik analiz, özellikle çekirdek duvar sistemi için eksenel kuvvet talebini daha düşük olarak dikkate alıyor gibi görünmektedir.
- c. Dalga yayılmasının dikkate alınması, analiz edilen modellerin dinamik davranışında gözlenen rezonansa yakın olayını (beating effect) etkilemiyor gibi görünmektedir.

### ***Gelecek için önerilen çalışmalar***

1. Yer hareketlerinin düşey bileşeninin ölçeklendirme faktörünü  $M_w < 5.5$  ile tahmin etmek için gelecekte çalışmaların yapılması gerekmektedir.
2. Dinamik tepkiyi değerlendirmek ve yüksek yapıların yapısal sağlık izlemesini gerçekleştirmek için dalga yayılım analizinin kullanımındaki sınırlamalara ilişkin kılavuzlar ve yönetmeliklerde bölümler hazırlanmalıdır.
3. Açık çözümleme tekniğinde sönüm sorunu, yüksek frekansların yüksek modlarını doğru bir şekilde değerlendirmek için daha ayrıntılı araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., Ay, B. O. 2013.** Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader Europe region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 517–547. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9537-1>
- Ambraseys, N. N., Douglas, J. 2003.** Near-field Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44(July 2002):
- ASCE/SEI 7-16 2017.** Minimum Design Loads and Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineers*.
- Assi, R., Dliga, M., Yao, G. 2017.** Horizontal and vertical seismic acceleration demands in multi-storey buildings. *Structures Congress 2017 : Structures Congress 2017*, 220–231.
- Bernal, D. 1994.** Viscous damping in inelastic structural response. *Journal of Structural Engineering*, 120(4):, 1240–1254.
- Beyer, K., Bommer, J. J. 2007.** Selection and scaling of real accelerograms for bi-directional loading: a review of current practice and code provisions. *Journal of earthquake engineering*. <https://doi.org/10.1080/13632460701280013>
- Bommer, J. J., Akkar, S., Kale, Ö. 2011.** A Model for Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratios for Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4):, 1783–1806. <https://doi.org/10.1785/0120100285>
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A. 2006.** Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4 A):, 1502–1511. <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Bozorgnia, Y., Campbell, K. W. 2004.** The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V / H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*. 175–207. <https://doi.org/10.1080/13632460409350486>
- Bozorgnia, Y., Campbell, K. W. 2015.** Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 32(2):, 979–1004. <https://doi.org/10.1193/072814EQS121M>
- Bozorgnia, Y., Campbell, K. W. 2016.** Ground motion model for the vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA, PGV, and response spectra. *Earthquake Spectra*, 32(2):, 951–978.
- Bozorgnia, Y., Niazi, M. 1995.** Characteristics of Free-Field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake. *Earthquake Spectra*, (June 2015): <https://doi.org/10.1193/1.1585825>

- Cai, G. Q., Lin, Y. K. 1991.** Wave propagation and scattering in structural networks. *Journal of engineering mechanics*, 117(7):, 1555–1574.
- Celebi, M. 1996.** Comparison of damping in buildings under low-amplitude and strong motions. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 59(2–3):, 309–323.
- Charney, F. A. 2008.** Unintended consequences of modeling damping in structures. *Journal of structural engineering*, 134(4):, 581–592.
- Cheng, Z., Lin, W., Shi, Z. 2018.** Wave dispersion analysis of multi-story frame building structures using the periodic structure theory. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106:, 215–230.
- Chopra, A. 2012,** Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Upper Saddle River: Pearson-Prentice Hall.
- Çelebi, M., Phan, L. T., Marshall, R. D. 1993.** Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-amplitude motions. *The structural design of tall buildings*, 2(1):, 1–15.
- Cork, T. G., Han, J., Mavroeidis, G. P., Kwan, J., Halldorsson, B., Papageorgiou, A. S. 2016.** Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80:, 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.09.011>
- Cruz, C., Miranda, E. 2017.** Evaluation of the Rayleigh damping model for buildings. *Engineering Structures*, 138:, 324–336.
- Dym, C. L., Williams, H. E. 2007.** Estimating fundamental frequencies of tall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 133(10):, 1479–1483.
- Ebrahimian, M., Trifunac, M. D., Todorovska, M. I. 2016.** Prediction of building response at any level from recorded roof response: The Kanai-Yoshizawa formula revisited. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80:, 241–250.
- Elgamal, A., He, L. 2008.** Vertical Earthquake Ground Motion Records: An Overview. *Journal of Earthquake Engineering*, 2469. <https://doi.org/10.1080/13632460409350505>
- Elnashai, A. S., Di Sarno, L. 2008.** Fundamentals of Earthquake Engineering. Wiley, London. <https://doi.org/10.1002/9780470024867>
- EN1998-1 2004.** Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. <https://doi.org/10.2514/2.2772>
- Erdik, M. 1999.** Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) Earthquakes. *Structural control for civil and infrastructure engineering: World Scientific*, 149-186. Report

on 1999 Kocaeli and 1999 Düzce (Turkey) Earthquakes.

- Fahjan, Y. M. 2008.** Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms. *Teknik Dergi*, 19(3):.
- FEMA P-750 2009.** the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences. Building seismic safety council. A council of the national institute of building sciences. Washington, D.C.
- Gicev, V., Trifunac, M. 2007a.** Energy and power of nonlinear waves in a seven story reinforced concrete building. *Journal of Indian Society of Earthquake Technology*, 44(1):, 305–323.
- Gicev, V., Trifunac, M. D. 2007b.** Permanent deformations and strains in a shear building excited by a strong motion pulse. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(8):, 774–792.
- Grundmann, H., Schuëller, G. I. 2002.** Structural Dynamics: EURO DYN 2002: Proceedings of the 4th [ie 5th] International Conference on Structural Dynamics, Munich, Germany, 2-5 September 2002 (Vol. 2), CRC Press.
- Gülerce, Z., Alipour, N. A., Sandikkaya, M. A. 2019.** Ground Motion Characterization for Vertical Ground Motions in Turkey—Part 2: Vertical Ground Motion Models and the Final Logic Tree. *Pure and Applied Geophysics*, 1–19.
- Gülerce, Z., Eeri, M., Abrahamson, N. A., Eeri, M. 2011.** Site-Specific Design Spectra for Vertical Ground Motion Site-Specific Design Spectra for Vertical Ground Motion. *Earthquake Spectra*, 27(November 2011):, 1023–1047. <https://doi.org/10.1193/1.3651317>
- Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., Wald, D. J. 1995.** Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings. *Earthquake Spectra*, , 569–605. <https://doi.org/10.1193/1.1585828>
- Harden, C. W., Hutchinson, T., Martin, G. R., Kutter, B. L. 2009.** Pacific Earthquake Engineering Research Center. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1546>
- Hart, G. C., Vasudevan, R. 1975.** Earthquake design of buildings: damping. *Journal of the Structural Division*, 101(1):, 11–30.
- Hudson, M. B., Skyers, B. D., Lew, M. 1996.** Vertical Strong Ground Motion Characteristics of the Northridge Earthquake. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.
- Ivanovic, S. S., Trifunac, M. D., Todorovska, M. D. 2001.** On identification of damage in structures via wave travel times. Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures : Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures. Part of the NATO Science Series book series (NSSE, volume 373).



Springer, Dordrecht. PP 447–467.

- Iwan, W. D. 1997.** Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. *Journal of structural engineering*, 123(4):, 397–404.
- Jeary, A. P. 1986.** Damping in tall buildings—a mechanism and a predictor. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 14(5):, 733–750.
- Kalkan, E., Eeri, S. M., Gulkan, P., Eeri, M. 2004.** Empirical Attenuation Equations for Vertical Ground Motion in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20(3):, 853–882. <https://doi.org/10.1193/1.1774183>
- Kalkan Erol, Chopra, A. K. 2010.** Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures. US geological survey open-file report, 1068(2010), p.126.
- Kanai, K., Yoshizawa, S. 1963.** Some new problems of seismic vibrations of a structure. Part 1. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, 41(4):, 825–833.
- Kanai, K., Yoshizawa, S. 1964.** 12. Some New Problems of Seismic Vibrations of a Structure: Part 2.(Case of a Dam). *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, 42(1):, 237–243.
- Kareem, A, Gurley, K., others 1996.** Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 59(2):, 131–157.
- Kareem, Ahsan 1981.** Wind-excited response of buildings in higher modes. *Journal of the Structural Division*, 107(4):, 701706.
- Kawakami, H, Oyunchimeg, M., Tingatinga, E. A. J. 2005.** Analysis of earthquake wave propagation in buildings. *WIT Transactions on The Built Environment*, 81:.
- Kawakami, Hideji, Haddadi, H. R. 1998.** Modeling wave propagation by using normalized input-output minimization (NIOM). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(2):, 117–126.
- Kawakami, Hideji, Oyunchimeg, M. 2003.** Normalized input-output minimization analysis of wave propagation in buildings. *Engineering Structures*, 25(11):, 1429–1442.
- Kerschen, G. 2015.** Nonlinear Dynamics, Volume 1: Proceedings of the 33rd IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics. Springer.
- Khansefid, A. 2020.** Pulse-like ground motions: Statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian Plateau. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 134:, 106164.
- Kim, W., Lee, J. H. 2018.** An improved explicit time integration method for linear and

nonlinear structural dynamics. *Computers & Structures*, 206:, 42–53.

- Kohler, M. D., Heaton, T. H., Bradford, S. C. 2007.** Propagating waves in the steel, moment-frame factor building recorded during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(4):, 1334–1345.
- Kunnath, S. K., Erduran, E., Chai, Y. H., Yashinsky, M. 2008.** Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings. *Journal of Bridge Engineering*, 13(3):, 282–290.
- Kwon, S.-B., Lee, J.-M. 2017.** A non-oscillatory time integration method for numerical simulation of stress wave propagations. *Computers & Structures*, 192:, 248–268.
- Kwong, N. S., Chopra, A. K. 2015.** Selection and scaling of ground motions for nonlinear response history analysis of buildings in performance-based earthquake engineering. *PhD thesis*. University of California, Berkeley.
- Manual, A. U. 2020.** Abaqus User Manual. Abacus.SIMULA.
- Masri, S. F. 1976.** Response of beams to propagating boundary excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(5):, 497–509.
- Michel, C., Gueguen, P. 2018.** Interpretation of the velocity measured in buildings by seismic interferometry based on Timoshenko beam theory under weak and moderate motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104:, 131–142.
- Miranda, E. 1992.** Seismic evaluation and upgrading of existing buildings. *PhD thesis*. University of California, Berkeley.
- Nakata, N., Snieder, R. 2014.** Monitoring a building using deconvolution interferometry. II: Ambient-vibration analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1):, 204–213.
- Nakata, N., Snieder, R., Kuroda, S., Ito, S., Aizawa, T., Kunimi, T. 2013.** Monitoring a building using deconvolution interferometry. I: Earthquake-data analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3):, 1662–1678.
- Newmark, N. M., Hall, W. J., Morgan, J. R. 1977.** Comparison of building response and free field motion in earthquakes. Proceeding of the 6th World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, India (Vol. 2), , 972–978.
- NIST GCR 11-917-15 2011.** Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Analyses. NEHRP Consultants Joint Venture. A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering.
- Noh, G., Bathe, K.-J. 2013.** An explicit time integration scheme for the analysis of wave propagation. *Computers & structures*, 129:, 178–193.
- Noroozinejad, F. E., Tasnimi, A. A. 2016.** The influence of coupled horizontal–vertical

ground excitations on the collapse margins of modern RC-MRFs. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 8(2), pp.169-192.

**Orouke, M. 1976.** Response to Stochastic Wind of N-degree Tall Buildings. *journal of the structural division-ASCE*, 102(12):, 2401–2403.

**Oyunchimeg, M., Kawakami, H. 2003.** A new method for propagation analysis of earthquake waves in damaged buildings: evolutionary normalized input-output minimization (NIOM). *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2(1):, 9–16.

**Ozmutlu, A., Ebrahimian, M., Todorovska, M. I. 2018.** Wave propagation in buildings as periodic structures: Timoshenko beam with rigid floor slabs model. *Journal of Engineering Mechanics*, 144(4):, 4018010.

**Papazoglou, A. J., Elnashai, A. S. 1996.** Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 25(May):, 1109–1137.

**PEER-NGA-West2database** Pacific Earthquake Engineering Research Center. . Retrieved from <https://peer.berkeley.edu/research/data-sciences/databases>

**PEER, N. G. A. 2013.** Strong motion database. See <http://ngawest2.berkeley.edu>.

**PEERReport2013/24 2013.** NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions.

**Priestley, M. J. N., Grant, D. N. 2005.** Viscous damping in seismic design and analysis. *Journal of earthquake engineering*, 9(spec02):, 229–255.

**Radiguet, M., Cotton, F., Manighetti, I., Campillo, M., Douglas, J. 2009.** Dependency of near-field ground motions on the structural maturity of the ruptured faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4):, 2572–2581. <https://doi.org/10.1785/0120080340>

**Rahmani, M., Ebrahimian, M., Todorovska, M. I. 2015.** Time-wave velocity analysis for early earthquake damage detection in buildings: Application to a damaged full-scale RC building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(4):, 619–636.

**Rahmani, M., Todorovska, M. I. 2013.** 1D system identification of buildings during earthquakes by seismic interferometry with waveform inversion of impulse responses—method and application to Millikan library. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47:, 157–174.

**Rahmani, M., Todorovska, M. I. 2015.** Structural health monitoring of a 54-story steel-frame building using a wave method and earthquake records. *Earthquake Spectra*, 31(1):, 501–525.

- Rayleigh, Lord 1877.** Theory of Sound f 109. Ed, 1, 93.
- Safak, E. 1998.** New approach to analyzing soil-building systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7–8):, 509–517.
- Şafak, E. 1998.** Propagation of seismic waves in tall buildings. *The Structural Design of Tall Buildings*, 7(4):, 295–306.
- SAFAK, E., HARMSEN, S. 2000.** Seismic hazard and design by using energy flux. Proceedings of the twelfth world conference on earthquake engineering. Paper (Vol. 658), 1–8.
- Satake, N., Suda, K., Arakawa, T., Sasaki, A., Tamura, Y. 2003.** Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan. *Journal of structural engineering*, 129(4):, 470–477.
- Scanlan, R. H. 1976.** Seismic wave effects on soil-structure interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(4):, 379–388.
- Silva, P. B., Goldstein, A. L., Arruda, J. R. F. 2013.** Building spectral element dynamic matrices using finite element models of waveguide slices and elastodynamic equations. *Shock and Vibration*, 20(3):, 439–458.
- Silva, W. 1997.** Characteristics of vertical strong ground motions for applications to engineering design. *Technical Report, NCEER-97-0010*. National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York, Buffalo, Red Jacket Quadrangle, Box 610025.
- Buffalo, NY United States 14261-0025
- Smyrou, E., Priestley, M. J. N., Carr, A. J. 2011.** Modelling of elastic damping in nonlinear time-history analyses of cantilever RC walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5):, 1559–1578.
- Snieder, R., Safak, E. 2006.** Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(2):, 586–598.
- Snieder, R., Sheiman, J., Calvert, R. 2006.** Equivalence of the virtual-source method and wave-field deconvolution in seismic interferometry. *Physical Review E*, 73(6):, 66620.
- Stagner, J. R. 1972.** Damping estimation and digital filtering applied to structural motion studies. *PhD thesis*. University of California, Los Angeles-Engineering.
- Todorovska, M I, Lee, V. W. 1989.** Seismic waves in buildings with shear walls or central core. *Journal of engineering mechanics*, 115(12):, 2669–2686.
- Todorovska, M I, Rahmani, M. 2012.** Recent advances in wave travel time based methodology for structural health monitoring and early earthquake damage detection

in buildings. *The 15th World Conf. on Earthqu. Eng* , 24–28.

- Todorovska, M I, Trifunac, M. D. 1989.** Antiplane Earthquake Waves in Long Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(12):, 2687–2708. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:12\(2687\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:12(2687))
- Todorovska, M I, Trifunac, M. D. 1990.** Propagation of Earthquake Waves in Buildings with Soft First Floor. *Journal of Engineering Mechanics*, 116(4):, 892–900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1990\)116:4\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:4(892))
- Todorovska, Maria I 2001.** Estimation of instantaneous frequency of signals using the continuous wavelet transform, University of Southern California, Department of Civil Engineering, *Report CE 01-07*, Los Angeles, California.
- Todorovska, Maria I 2009a.** Earthquake Damage: Detection and Early Warning in Man-made Structures, Chapter in “Encyclopedia of Complexity and System Science”, RA Meyers (Ed.), Section on Complexity in Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes, and Forecasting and Early Warning of their Hazards, WHK Lee (Section Ed.)" , Springer.
- Todorovska, Maria I 2009b.** Seismic interferometry of a soil-structure interaction model with coupled horizontal and rocking response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A):, 611–625.
- Todorovska, Maria I 2009c.** Soil-structure system identification of Millikan Library North--South response during four earthquakes (1970--2002): What caused the observed wandering of the system frequencies?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A):, 626–635.
- Todorovska, Maria I, Al Rjoub, Y. 2006.** Effects of rainfall on soil--structure system frequency: examples based on poroelasticity and a comparison with full-scale measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(6–7):, 708–717.
- Todorovska, Maria I, Trifunac, M. D. 2006.** Impulse response analysis of the Van Nuys 7-story hotel during 11 earthquakes (1971-1994): one-dimensional wave propagation and inferences on global and local reduction of stiffness due to earthquake damage. *Report CE 06-01*, Los Angeles, California .
- Todorovska, Maria I, Trifunac, M. D. 2008a.** Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building III: analysis of wave travel times via impulse response functions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(5):, 387–404.
- Todorovska, Maria I, Trifunac, M. D. 2008b.** Impulse response analysis of the Van Nuys 7-storey hotel during 11 earthquakes and earthquake damage detection. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 15(1):, 90–116.
- Todorovska, Marija I, Lee, V. W., Trifunac, M. D. 1988.** Investigation of earthquake response of long buildings. *PhD thesis*. University of Southern California, Department of Civil Engineering.

- Todorovska, M. I., Ivanović, S. S., Trifunac, M. D. 2001.** Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building II. Observed wavenumbers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(225):, 236.
- Trifunac, M. D. 1972.** Interaction of a shear wall with the soil for incident plane SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(1):, 63–83.
- Trifunac, M. D., Ivanović, S. S., Todorovska, M. I. 2003.** Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III. Damage detection via changes in wavenumbers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(1):, 65–75.
- Wei, B., Hu, Z., He, X., Jiang, L. 2020.** Evaluation of optimal ground motion intensity measures and seismic fragility analysis of a multi-pylon cable-stayed bridge with super-high piers in Mountainous Areas. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129:, 105945.
- Wei, B., Li, C., He, X. 2019.** The applicability of different earthquake intensity measures to the seismic vulnerability of a high-speed railway continuous bridge. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7):, 981–997.
- Werner, S. D., Lee, L. C., Wong, H. L., Trifunac, M. D. 1977.** An evaluation of the effects of traveling seismic waves on the three-dimensional response of structures. NASA STI/Recon. Technical Report N, 78, p.20378.
- Westergaard, H. M. 1933.** Earthquake-shock transmission in tall buildings. *Eng. News-Rec*, 111.22:, 654–656.
- Wong, H. L., Trifunac, M. D. 1974.** Interaction of a shear wall with the soil for incident plane SH waves: elliptical rigid foundation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(6):, 1825–1842.
- Yokoo, Y., Akiyama, H. 1972.** Lateral vibration and damping due to wind and earthquake effects. Proc. of the Int'l Conf. On Planning and Design of Tall Buildings : Proc. of the Int'l Conf. On Planning and Design of Tall Buildings.
- Zhang, J., Xu, Y. L., Li, J. 2011.** Integrated system identification and reliability evaluation of stochastic building structures. *Probabilistic engineering mechanics*, 26(4):, 528–538.
- Zhang, R. R., Snieder, R., Gargab, L., Seibi, A. 2011.** Modeling of seismic wave motion in high-rise buildings. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 26(4):, 520–527.
- Zhong, J., Jeon, J.-S., Shao, Y.-H., Chen, L. 2019.** Optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of cable-stayed bridges subjected to pulse-like ground motions. *Journal of Bridge Engineering*, 24(2):, 4018118.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fikret MEHDİ  
Doğum Yeri ve Tarihi : 03/01/1982  
Yabancı Dil : İngilizce/ Türkçe/ Almanca/Arapça.  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar : ACE-Arab Consulting Engineers "Moharram-Bakhom/  
Egypt"  
İletişim (e-posta) : [fkrtmehdi@gmail.com](mailto:fkrtmehdi@gmail.com)

### Yayınları

**F. ALMahdi, Y. Fahjan, A. Doğangün, 2021.** Critical remarks on Rayleigh damping model considering the explicit scheme for the dynamic response analysis of high rise buildings, *Advances in Structural Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1177/1369433220988621>.

**F. ALMahdi, Y. Fahjan, A. Doğangün, 2020.** Scaling of vertical component of seismic ground motion, *Alexandria Engineering Journal* 59 (5) (2020) 3827–3845.

**F. ALMahdi, A. Doğangün, F. Genç, W. Rasekh, M.Ö. Timurağaoğlu, 2020.** Investigation of snow-induced collapse in Bözyük market. *Engineering Failure Analysis* 118 (2020) 104822.

**A. Doğangün, F. Genç, F. ALMahdi, M.Ö. Timurağaoğlu, 2018.** Yapılar için kar yüklerinin ve kar kaynaklı hasarların değerlendirilmesi, 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya University Culture and Congress Center, Sakarya-Turkey 04-06 May 2018.

**M.Ö. Timurağaoğlu, A. Doğangün, F. ALMahdi, 2018.** Yapılar için Rüzgar Yüklerinin ve Rüzgar Kaynaklı Hasarların Değerlendirilmesi, 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya University Culture and Congress Center, Sakarya-Turkey 04-06 May 2018.

**F. ALMahdi, A. Doğangün, 2017.** The Seismic Behavior of High Rise Building subjected to Far Field Ground Motions, ICENS: III International conference on engineering and natural science, 2017-05-04.