

YÜKSEK BİNALARIN DİNAMİK TEPKİ ANALİZİ İÇİN DALGA YAYILIMININ İRDELENMESİ

Fikret MEHDİ * 
Adem DOĞANGÜN ** 
Yasin FAHJAN *** 

Alınma:01.01.2022; düzeltme:14.03.2022; kabul:29.05.2022

Öz: Bu çalışmanın amacı, sismik dalga yayılımı olgusunu dikkate almanın yüksek binaların dinamik tepkisi üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmaktır. Bir çekirdek duvar ve bir çerçeve, dalga yayılımı olgusu göz önünde bulundurularak ve göz ardı edilerek sismik yükleme altında analiz edilmiştir. Analiz edilen her iki sistem için eğilme momenti, kesme kuvveti, eksenel kuvvet ve katlar arası ötelenme değerlendirilmiştir. Farklı katlardaki dinamik tepki için genlik Fourier tepki spektrumları da tartışılmıştır. Her biri kırk altı katlı, her iki sistem de sabit tabanda enine ve boyuna sismik dalgalara maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, dalga yayılım fenomeni göz önüne alındığında, katlar arası sürüklenme, kesme kuvveti ve eğilme momentinde hafif bir azalma sağladığını göstermektedir. Dalga yayılım olgusunun dikkate alınmasının, özellikle üstteki üçüncü bölümün katlarındaki çekirdek duvar için eksenel kuvveti önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Bu makalenin ana katkısı, kategorize edilemeyen ve her farklı detayın farklı bir tepkiyi tetikleyebileceği "kod dışı" binalar olan yüksek binalarda dalga yayılımı olgusunu dikkate almaya yönelik büyük ihtiyacı vurgulamaktır. Daha da önemlisi, dalga yayılım fenomeninin temel fiziğini doğru bir şekilde yakalamak ve analizi hassas bir şekilde gerçekleştirmek için standart analiz ve tasarım mühendislik yazılımlarını yükseltme ihtiyacıdır.

Anahtar Kelimeler: : Dalga yayılımı, basınç dalgası, kayma dalgası, deprem dalgası, yüksek yapılar, sayısal modelleme.

Wave Propagation Approach for Dynamic Response Analysis of High-Rise Buildings

Abstract: This paper numerically investigates the impact of considering the seismic wave propagation phenomenon on the dynamic response of high-rise buildings. A core wall and a frame are analyzed under seismic loading considering wave propagation phenomenon and ignoring it. The bending moment, shear force, axial force, and inter-story drift for both analyzed systems are evaluated. The amplitude Fourier response spectra for the dynamic response at different stories are discussed as well. Forty-six stories each, both systems are subjected to transverse and longitudinal seismic waves at the fixed base. The results show that considering the wave propagation phenomenon yields a slight decrease in the inter-story drift, shear force, and bending moment. It is found that considering wave propagation phenomenon increases the axial force significantly, especially for the core wall at the floors of the top third part. It is worth

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Bölümü, Görükle Kampüs-Nilüfer, 16059, Bursa/Türkiye.

Fikret MEHDİ (fkrtmehdi@gmail.com)

** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Bölümü, Görükle Kampüs-Nilüfer, 16059, Bursa/Türkiye.

Adem DOĞANGÜN (adogangun@uludag.edu.tr)

*** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, 34469, Maslak, İstanbul / Türkiye.

Yasin FAHJAN (fahjan@itu.edu.tr)

pointing out that high-rise buildings cannot be categorized, and every single different detail can trigger a different response. Thus, the main contribution of this paper is to highlight the drastic need to consider wave propagation phenomenon in such "out of code" buildings. The more important is a need to upgrade the standard analysis and design engineering packages to accurately capture the essential physics of the wave propagation phenomenon and perform the analysis precisely.

Keywords: Wave propagation, compression wave, shear wave, earthquake wave, high rise buildings, and numerical analysis.

1. GİRİŞ

Dalga yayılımı yaklaşımının son doksan yılda geliştirilen analitik modeller ve teoriler aracılığıyla incelendiği bilinmektedir. Önerilen teorik modellerin doğrulanması, genel olarak binalara yerleştirilen cihazlardan alınan verilere dayanıyordu. Westergaard tarafından 1933 senesinde basılmış olan çalışmada, bina yüksekliği boyunca bir kesme dalgası tepe noktasının idealleştirilmiş yayılımı irdelenmiştir. Basitleştirilmiş bir analitik yöntem kullanılan çalışmada, yüksek bir binada hareket eden dalgaların hızları, yansımaları ve büyümeleri irdelenmiştir. Sönüme ilave olarak hareket eden dalgaların birden fazla yansımalarının da enerji kaybında etkisinin olabileceği belirtilmiştir (Westergaard 1933).

Kanai ve Yoshizawa, dalga yayılım prosedürünü uygulamak için analitik bir model önermişlerdir (Kanai ve Yoshizawa 1963). Araştırmacılar, bir yapının herhangi bir seviyedeki tepkisini elde etmek için tepe noktasının hareketine bağlı olarak basitleştirilmiş bir formül önermişlerdir. 2016 yılında bu formül, bir referans yüzeyinin hareketine dayalı bir yapının tepkisini elde etmek için pratik bir araç olarak onaylanmıştır (Ebrahimian ve ark. 2016). Todorovska ve diğerleri tarafından, dalga yayılım prosedürü, iki boyutlu bir analitik modele yükseltilmiştir (Marija I Todorovska ve ark. 1988). Bununla birlikte, Todorovska ve Trifunac (1990), yumuşak birinci katın binaların dinamik tepkisi üzerindeki etkisini irdelenmişlerdir.

Çok katlı binalarda meydana gelen hasarları belirleyebilmek ve tespit edebilmek için dalga yayılımının kullanımı ilk olarak Erdal Şafak tarafından gerçekleştirilmiştir (Şafak 1998a,b). Bu yaklaşımda, bina katları çok katmanlı zemin modeli gibi ayrı katmanlar olarak modellenmiştir. Bununla birlikte, sönüm ve zemine geri yansıyan enerjinin dağılımı dikkate alınmış, temelin dönme etkisi ise ihmal edilmiştir.

2003 yılında, frekans alanındaki giriş ve çıkış kayıtlarının ortalama kare değerlerinin toplamını en aza indirmeye bağlı, yeni bir normalleştirilmiş girdi-çıkış minimizasyonu (NIOM) yöntemi önerilmiştir (Kawakami ve Oyunchimeg 2003). 2005 yılında, Kawakami ve Oyunchimeg NIOM yöntemini kuvvetli yer hareketi kayıtlarını analiz etmek için Los Angeles'de dört gerçek bina üzerinde (14 katlı Hollywood deposu; 5 yeraltı katı; 52 katlı ofis binası; 3 katlı ticari bina) kullanmışlardır (Kawakami ve ark. 2005). Ayrıca geliştirdikleri kayma-yay modelini hasarlı olan 7 katlı Van Nuys otelinde uygulamışlardır. Gerçekleştirilen çalışma, yapıdaki hasarın derecesi için NIOM yönteminin deprem esnasında meydana gelen dalganın geliş süresinin binadaki hasarlı elemanlarda hasarsız elemanlara göre daha fazla arttığını gösterebilecek şekilde üstün niteliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Saha izleme veri tabanlarının mevcudiyeti, araştırmacıların dalga yayılımı dikkate alınarak önerilen analitik ve teorik çözümlerini doğrulamalarına yardımcı olmuştur ve ark., 2013, Rahmani ve Todorovska, 2014, Şafak, 1998, Ozmutlu ve ark. 2018).

Aletlerin yerleştirildiği binalardan biri, Van Nuys, California'da yedi katlı bir otel binasıydı. Bu bina, yayılan dalganın dağılım eğrileri ve dalga sayıları gibi çeşitli parametreleri ele alan birçok araştırma türü için kaynak teşkil etmiştir (Ivanovic ve ark. 2001). Bu tür çalışmalar, yapısal sağlık izleme aracı olarak kullanılmak ve yapısal hasarın yerini belirlemek için dalga yayılım analizine yeni bir bakış açısı oluşturmuştur (Todorovska ve ark. 2001).

Özetle, dalga yayılımı çeşitli teoriler ve doğrulanmış analitik modeller aracılığıyla derinlemesine irdelense de, sayısal yorumlamaları kısıtlı kalmıştır. Bilgisayar teknolojilerindeki

ilerlemeler, herhangi bir yük koşulu altında yapıların dinamik davranışının sayısal olarak gerçekçi bir şekilde modellenmesine imkan tanımaktadır. Günümüzdeki teknolojik gelişmelerden yararlanarak, bu çalışmanın temel amacı, yüksek binaların dinamik davranışı üzerinde dalga yayılımını dikkate almanın meydana getireceği etkileri irdelemek olarak seçilmiştir. Bunun için dalga yayılımını dikkate alarak ve ihmal ederek yüksek binalar için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

2. METODOLOJİ

Yapısal analiz modelleme, hesaplama ve sonuçların irdelenmesi olmak üzere, üç farklı aşamadan oluşmaktadır. Bu çalışmada, dalga yayılım prosedürünü dikkate alarak (CWP) ve ihmal ederek (IWP) dinamik analizler yapmak için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Açık çözüm tekniği (merkezi farklar yöntemi) dalga yayılım analizini yapabilmek için kullanılmıştır. Dalga yayılımı ihmal ederek dinamik analizi gerçekleştirmek için ise kapalı çözüm yöntemi (Newmark yöntemi) kullanılmıştır. Bir çekirdek perde duvar sistemi ve 46 katlı bir çerçeve sistem üç deprem setine tabi tutulmuştur (Tablo 1). Üç deprem seti dikkate alınarak sismik dalgalar boyuna doğrultuda basınç, enine doğrultuda ise kesme dalgaları olarak uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Çerçeve sistem için malzeme özellikleri ve kat yükseklikleri.

Kat Numarası	Kat yüksekliği (m)	Kolon enkesit boyutları (m ²)	Beton
1 - 4	3,20	1,2 x 1,2	C70
5 - 6	4,20	1,2 x 1,2	C55
7 - 18	3,20	1,2 x 1,2	C55
19 - 22	3,20	1,0 x 1,0	C40
23 - 32	3,20	1,0 x 1,0	C35
33 - 46	3,20	0,9 x 0,9	C35

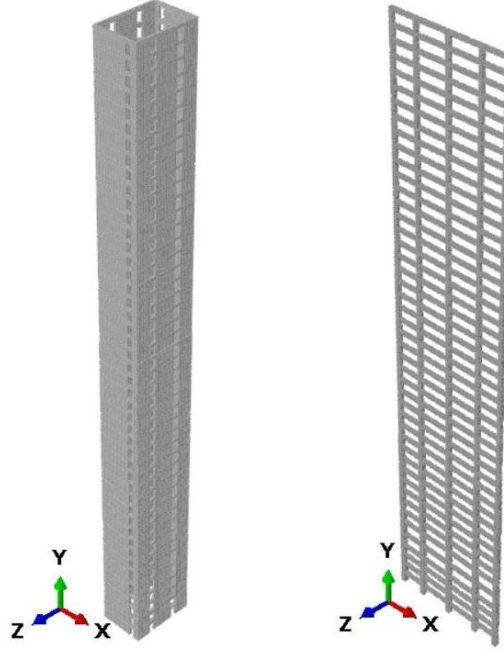
Tablo 2. Analizlerde dikkate alınan yer hareketleri.

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

Normal kuvvet (N), eğilme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve görelî kat ötelenmesi (ID) değerleri her deprem için 1, 10, 20, 31, 38 ve 46. katlarda irdelenmiştir. Uygulanan sayısal zaman entegrasyon yönteminin açık çözüm tekniği ile ilgili gürültüyü ortadan kaldırmak için 30 Hz kesme frekansına sahip dördüncü dereceden bir Butterworth filtresi uygulanmıştır. Sönüm için yaygın olarak bilinen klasik Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Çalışmada yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmiştir.

3. MODELLEME

Bu çalışmada, Şekil 1’de kat planı gösterilen, merkez betonarme perde duvarlı ve çerçeve taşıyıcı sistemden oluşmuş 46 katlı yapı dikkate alınmıştır.



Şekil 2:

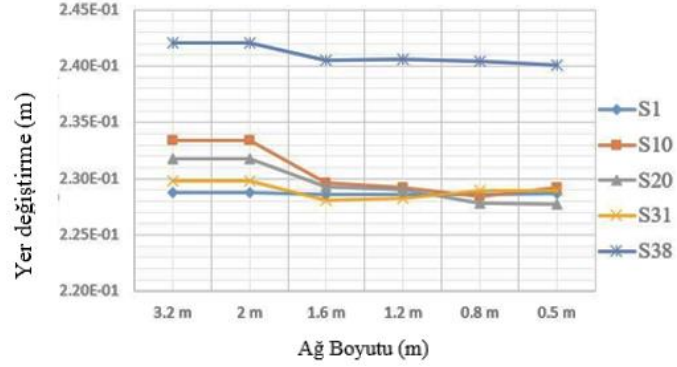
Çekirdek perde duvarların ve çerçeve sisteminin 3 boyutlu görünümü

Çekirdek perde ve çerçeve sistem, katı bir sonlu eleman olan C3D8R elemanı kullanılarak modellenmiştir. Sonlu eleman ağı, altıgen yapıları oluşturulmuştur. Kabul edilebilir sonuçlar elde etmek için uygun ağ boyutu araştırılmıştır. Buna bağlı olarak, Merkez duvar modeli, Tablo 3'de gösterildiği gibi çeşitli ağ boyutlarıyla simüle edilmiştir. Elemanların ve düğümlerin sayısı, toplam CPU süresi ve kararlı zaman artışı, her bir ağ boyutu için Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 3: Eleman boyutu, eleman ve düğüm noktası sayısı, CPU zamanı ve zaman artımı tablosu

Eleman boyutu (m)	Düğüm noktası sayısı	Eleman sayısı	CPU zamanı (saniye)	Zaman artımı (saniye)
0,5	63074	29390	2,2	2,38E-06
0,8	24230	10872	1,5	4,53E-06
1,2	12902	5791	1,0	7,33E-06
1,6	10158	4450	1,0	9,49E-06
2,0	6356	2820	0,5	9,49E-06
3,2	4844	2090	0,5	1,38E-05

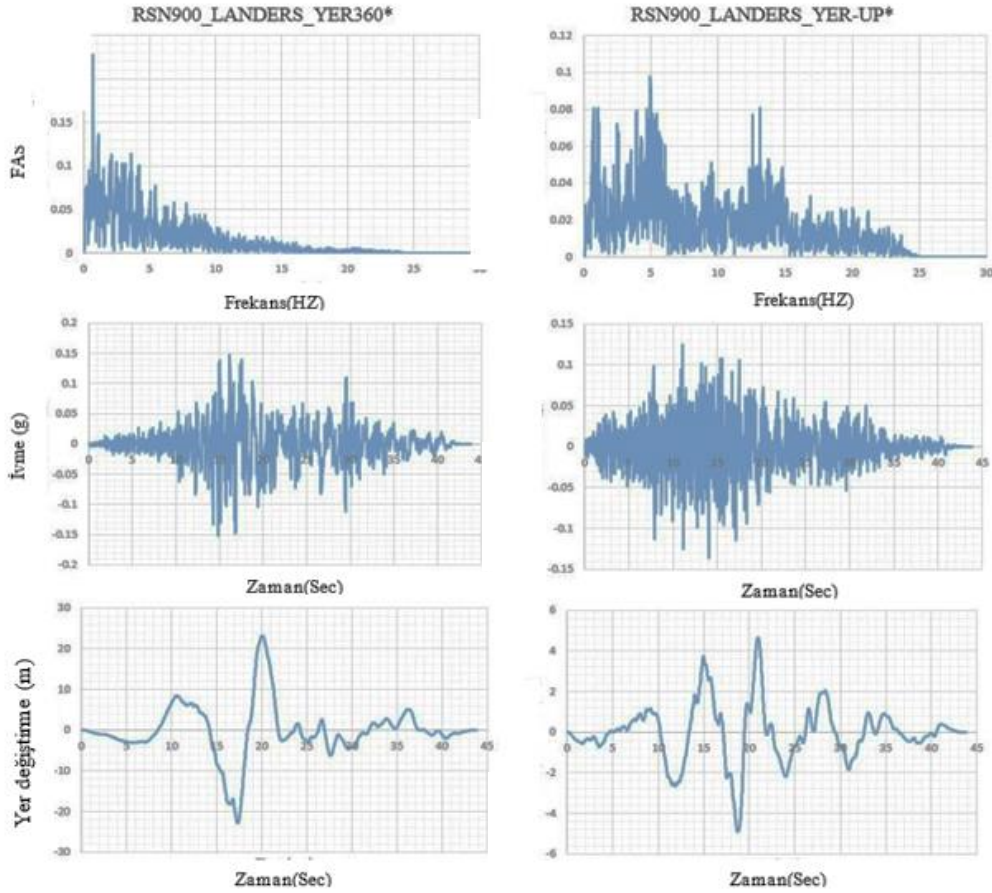
Şekil 3'de Tablo 3 ile bağlantılı olarak, 0,5m ağ boyutunun kararlı bir yer değiştirme değeri ve daha az kararlı zaman artışı sağladığı görülmektedir. Böylece her iki sistem için 0,5m ağ boyutu kullanılmıştır (ALMahdi et al. 2021). Bu çalışmada, merkez duvar sistemi (29390) 63074 düğümlü C3D8R elemanından ve çerçeve sistemi ise 49053 düğümlü (24704) C3D8R elemanından oluşmaktadır. Kararlı zaman artışı olarak, merkez betonarme perde duvarlar için $1,86495e-05$, çerçeve sistem için ise $2,17443e-05$ olarak dikkate alınmıştır.



şekil 3:

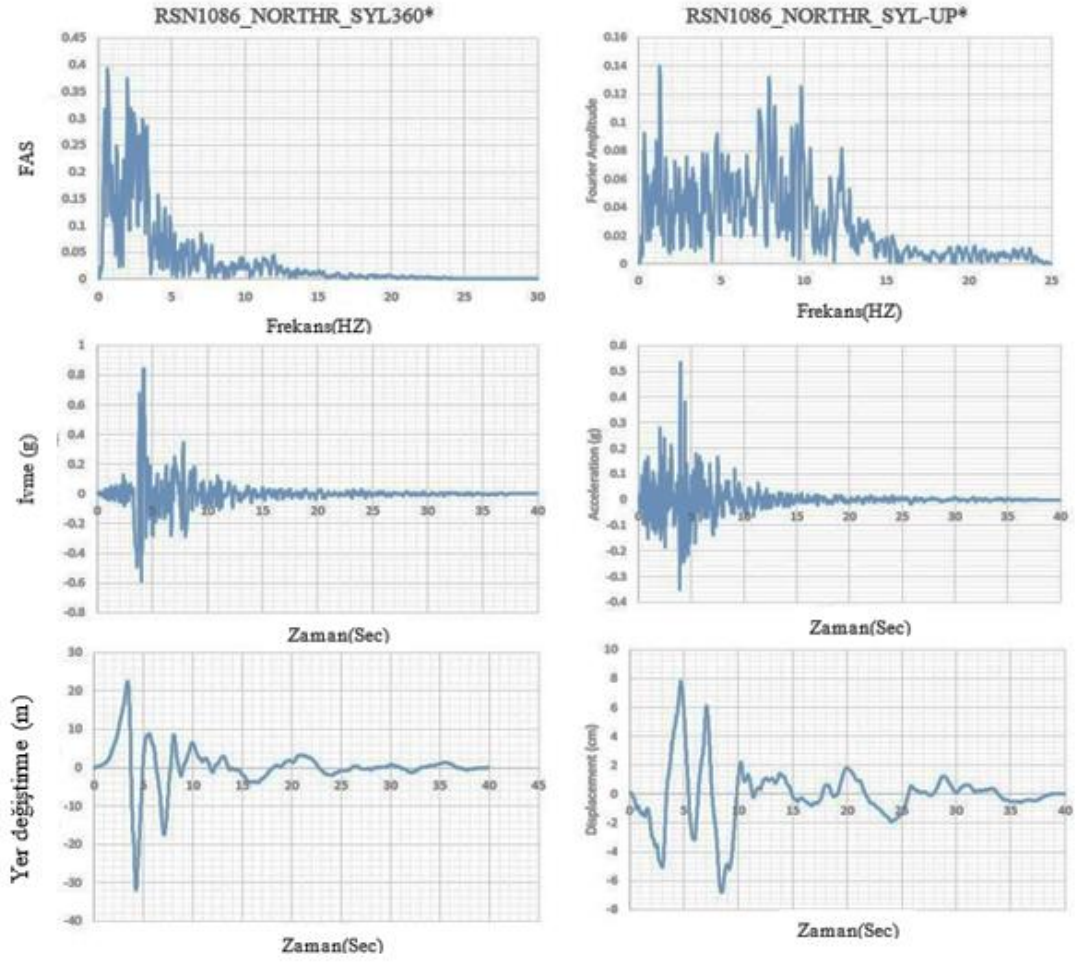
1, 10, 20, 31 ve 38. katlarda sonlu eleman aę boyutuna (MS) bağlı yer değiştirme (m).

Merkez perde duvar ve çerçeve sistem modelleri üç deprem setinden oluşan sismik dalgalara maruz kalmaktadır. Deprem kayıtları, PEER-NGA kuvvetli hareket veri tabanından elde edilmiştir (PEERReport2013/24 2013). Uygulanan sismik dalga kayıtlarının yatay ve dikey bileşenleri için zaman geçmişi ve amplitüd Fourier Spektrumları şekil 4, 5, ve 6'da gösterilmektedir.

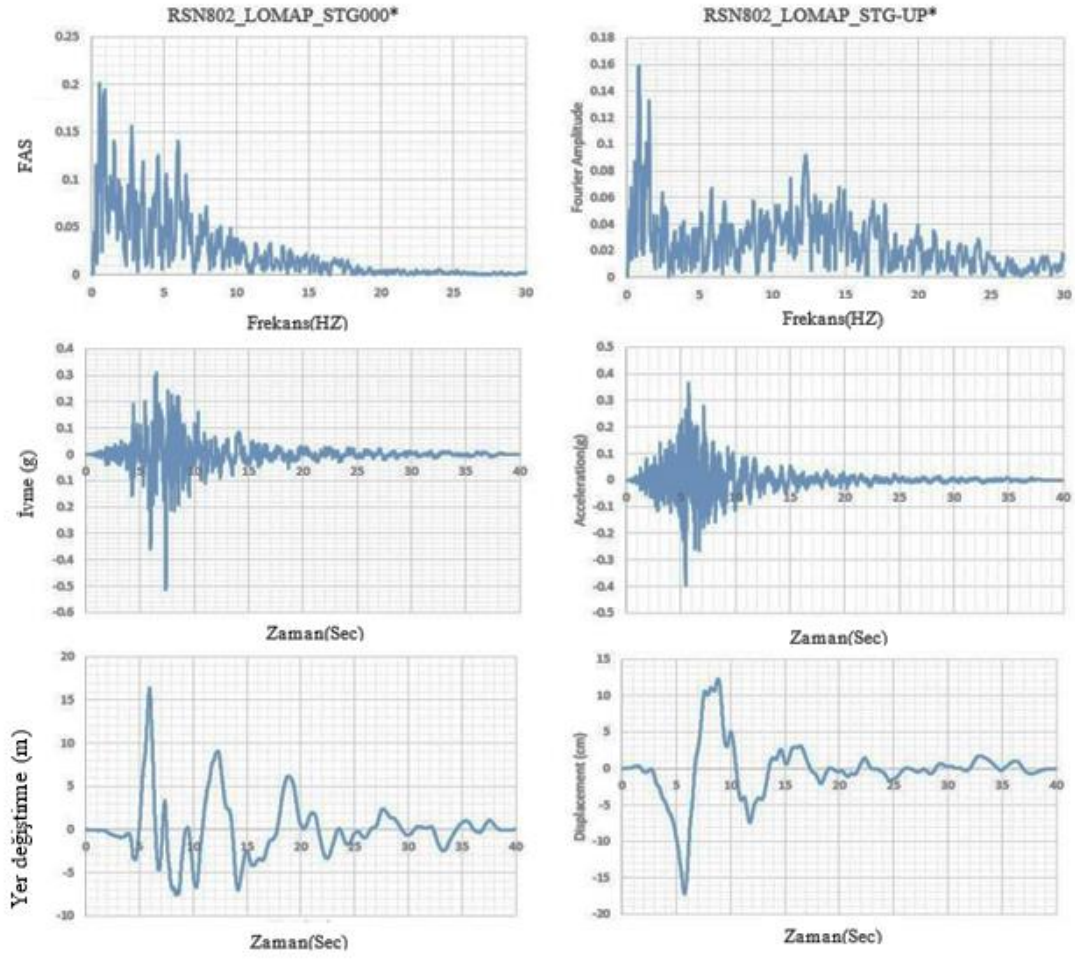


şekil 4:

1992 Landers depremi için sismik dalgalar (Yermo İtfaiye İstasyonu).



Şekil 5:
1994 Northridge depremi için sismik dalgalar (Sylmar-Olive View Med FF istasyonu)



şekil 6:
1989 Loma Prieta Depremi için sismik dalgalar (Saratoga-Aloha Ave İstasyonu).

Tablo 4’de, merkez duvarlar ve çerçeve sistemi için 20 mod şeklinin titreşim özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 4. Dikkate alınan yapının ilk 20 moduna ilişkin frekans ve periyot değerleri

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

4. YÜKSEK BİNALARIN DİNAMİK TEPKİ ANALİZİ İÇİN DALGA YAYILIMI YAKLAŞIMI

Katı ortama sahip cisim içerisinde, bir dalganın üç yönde yayıldığı bilinmektedir. Yüksek bir bina durumunda, uyarma dalgası binanın yüksekliğince, serbest mesnet ucu olan çatıya kadar yayılmakta ve geri yansımaktadır. Binanın tüm sistemi tek boyutlu bir dalga kılavuzu zinciri olarak yorumlanabilir. Dolayısıyla, yukarı doğru ilerleyen dalga saçılımları, katlarda kısmen iletilecek ve kısmen yansıtılacaktır. Böylece, eş zamanlı yukarı ve aşağı hareket eden bir dalga sistemi oluşturulmaktadır. Bu nedenle, bir zaman ölçeğinde, bir parçacık, ilk iletilen ve çoklu yansıyan dalgalar nedeniyle üretilen yeni dalgaların karmaşık bir örtüşmesine maruz kalmaktadır. Dalga yayılım analizi prosedürü, bilgi dönüşümünün eleman eleman yapılması, bu da dalganın bir elemandan bitişik elemana herhangi bir sıçrama olmadan transfer edilmesi anlamına gelmektedir.

Bu bağlamda, açık zamanlı entegrasyon yöntemleri tercih edilmektedir (merkezi fark yöntemi). Burada hareket denklemleri ayrık denklemler olarak çözülür ve tüm sistemin rijitlik

matrisini oluşturmaya gerek yoktur; dolayısıyla denklemler aynı anda çözülmez. Bu durum göz önüne alındığında, merkez duvarlar ve çerçeve yüksek katlı sistemler boyunca uygulanan enine ve boyuna deprem dalgalarının dalga yayılım analizini gerçekleştirmek için burada açık operatör kullanılmaktadır. Dalga yayılım analizi prosedürünü dikkate alan merkez duvar modeli ve çerçeve modelinin dinamik tepkileri, söz konusu prosedür göz ardı edilerek dinamik tepkileriyle karşılaştırılır. Böylece, dalga yayılım prosedürünün saf etkisi açıkça gösterilebilir.

4.1. Açık dinamik analiz prosedürü

Açık çözüm tekniği, merkezi fark yöntemi göz önüne alındığında, birinci dereceden katı eleman durumunda olan köşegen kütle matrisleri, açık yöntemin hesaplama verimliliğini yönetmektedir. Burada ilk artıştaki ivme, toplu kütle matrisine, yük vektörüne ve iç kuvvet vektörüne bağlı olarak elde edilmektedir. Bu nedenle, yinelemeli hesaplamalar veya teğet rijitlik gerekli değildir. İç kuvvetler, bireysel elemanlara dayalı olarak birleştirilmektedir, bu nedenle global rijitlik matrisini (Manual 2020) hesaplamaya gerek yoktur. Yer değiştirme ve hız, Denklem 1. ve 2. denklemlerinde gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\dot{u}_{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}_{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$u_{(i+1)} = u_i + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+\frac{1}{2})} \quad (2)$$

Burada i artış numarasını göstermektedir.

Merkezi fark zaman entegrasyon yöntemi koşullu kararlıdır. Denklem 3'ten görüldüğü üzere, sıfır sönümleme ile kararlılık sınırı en yüksek w_{max} frekansına dayalıdır.

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max}} \quad (3)$$

Denklem 4'te verilen, kararlılık limiti (L_{min}) sonlu elemanlar ağındaki en küçük eleman boyutu boyunca C_d dilatasyon dalgasının en kısa geçiş süresi olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta t \approx \frac{L_{min}}{C_d} \quad (4)$$

4.2. Direkt entegrasyon kullanarak kapalı çözüm dinamik analiz

Hilber-Hughes-Taylor zaman entegrasyon yöntemi, dalga yayılım prosedürünü göz ardı ederek dinamik analiz gerçekleştirmek için uygulanmaktadır. Bu yöntem, Newmark β yönteminin bir uzantısıdır. Kapalı operatör, uygulanan dalga yüklemesi eşzamanlı olarak tüm seviyelere ulaşıyormuş gibi hareket denklemlerini aynı anda çözmektedir. Hız ve yer değiştirme, Denklemler 5, 6, 7 ve 8'de gösterildiği gibi β ve γ aracılığıyla ilişkilidir.

$$u_{(t+\Delta t)} = u_t + \Delta t \dot{u}_{(t)} + \Delta t^2 \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_{(t)} + \beta \ddot{u}_{(t+\Delta t)} \right) \quad (5)$$

$$\dot{u}_{(t+\Delta t)} = \dot{u}_{(t)} + \Delta t \left((1 - \gamma) \ddot{u}_{(t)} + \gamma \ddot{u}_{(t+\Delta t)} \right) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2 \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad (8)$$

5. BULGULAR

Yüksek katlı binaların dinamik tepkisi üzerinde dalga yayılım analizinin etkisini irdelemek için, ankastre mesnetli merkez perde duvar ve çerçeve betonarme sistem boyuna ve enine doğrultuda sismik dalgaların etkisine maruz bırakılmıştır. Kapalı ve açık çözüm teknikleri kullanılarak yüksek yapının her iki kısmının modeli analiz edilmiştir. Dalga yayılımının dikkate alındığı dinamik tepkinin maksimum mutlak değerinin, dalga yayılımın ihmal edildiği dinamik tepkinin maksimum mutlak değerine oranı, Tablo 5, Tablo 6, ve Tablo 7 'de gösterildiği gibi Landers 1992, Northridge 1994 ve Loma Prieta 1989 depremlerinin veri setleri için hesaplanmaktadır.

Tablo 5. Landers depremi etkisindeki merkez 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

Tablo 6. Northridge depremi etkisindeki bina 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

Tablo 7. Loma Prieta depremi etkisindeki bina için yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

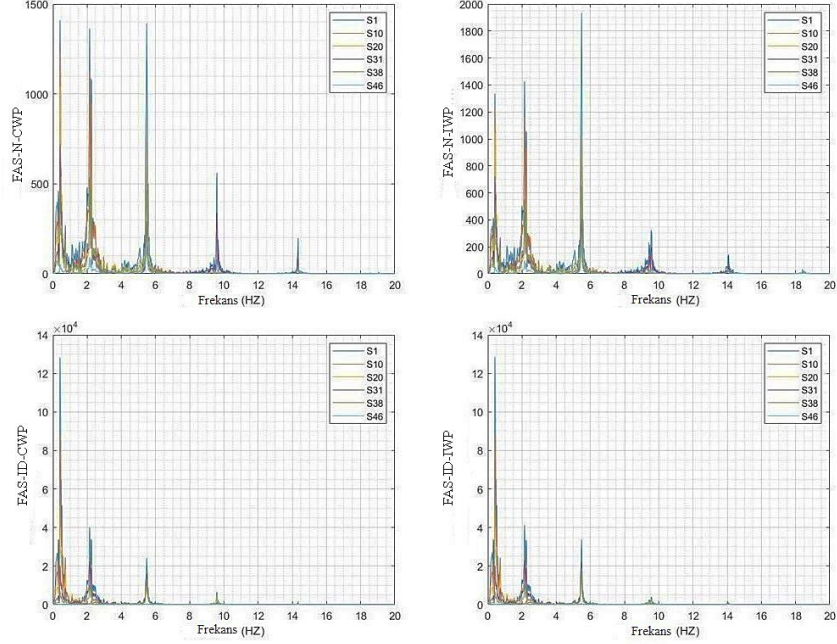
LOMA	S1	S10	S20	S31	S38	S46
Çekirdek perde duvar						
ID	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
V	0,91	0,98	0,98	0,98	0,96	0,80
M	0,98	1,00	0,99	1,05	0,90	0,84
N	1,10	1,04	1,04	1,29	1,45	1,56
Çerçeve sistem						
ID	0,98	1,00	0,99	0,98	1,01	0,98
V	0,98	0,98	1,02	1,01	1,03	0,97
M	0,99	0,98	1,00	0,97	0,94	0,87
N	0,94	1,01	0,93	0,92	1,09	1,23

Üç deprem seti dikkate alınarak elde edilen bulgular yapısal dinamik tepkilerin ortalama değerine bağlı olarak belirlenmektedir (Tablo 8). Landers sismik kayıtları kullanılarak dikkate alınan her iki model için eğilme momenti ve kesme kuvveti ile görelî kat ötelenmelerinin zamanla değişimleri sunulmaktadır. Loma Prieta düşey deprem kayıtları kullanılarak her iki model için normal kuvvetlerin zamanla değişimleri ise merkez perde duvar ve çerçeve sistemi için ayrı ayrı sunulmaktadır. IDIWP ve IDCWP değerlerinin, merkez perde duvar için yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu Tablo 8 den görülmektedir. Çerçeve sistemi için katlar arası kayma, ilk katta ve çerçeve yüksekliğinin üçüncü ve dördüncü üst çeyreğinin katlarında % 3-4 aralığında kalmaktadır. Merkez perde duvar ve çerçeve sistem modelleri için, eğilme momenti üst katlarda %6-7 aralığında azalmaktadır. Benzer sonuç, her iki model için de yükseklik ile birlikte % 2-5 aralığında azalan kesme kuvveti için de söylenebilir. Enine sismik dalgalar altındaki diğer yapısal tepkilerin aksine, merkez duvar modeli için normal kuvvet, merkez duvarın en üst son çeyreğinin üst katlarında % 15-27 aralığında önemli bir değerle artmaktadır (Tablo 8). Bununla birlikte, normal kuvvet çerçeve sisteminin yüksekliği boyunca % 2-8 aralığında artmaktadır. Gözlenen artış, düşey sismik dalgalar altında merkez perde duvar ve çerçeve sistem için boyuna mod şekillerinin frekanslarında belirgin olmaktadır. Son olarak, dalga yayılım analizinin dikkate alınması “beating” olayını etkilememektedir. “Beating” olayı, tipik olarak yakın frekanslara sahip olan öteleme ve burulma modları arasındaki belirgin eşleşmenin neden olduğu periyodik bir titreşim davranışıdır (M.Çelebi ve ark. 2016). “Beating” olayı, hem CWP hem de IWP modelleri için eğilme momentinde, kesme kuvvetinde ve katlar arası kaymada gözlenmektedir.

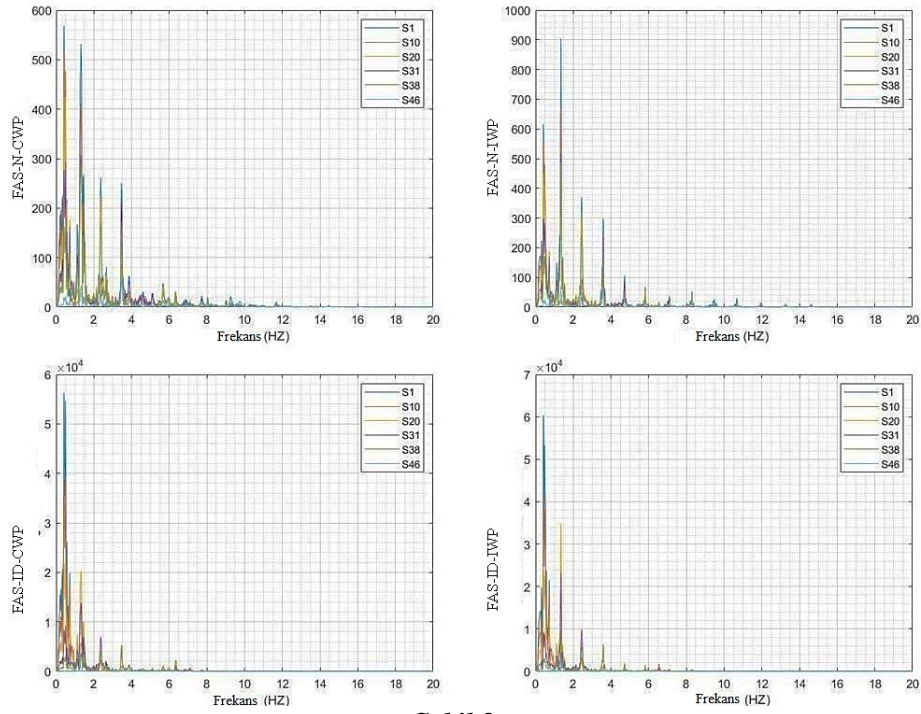
Tablo 8. Üç set depremin etkisindeki binada ortalama yapısal tepkilerin (CWP / IWP) oranı.

Tepki	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

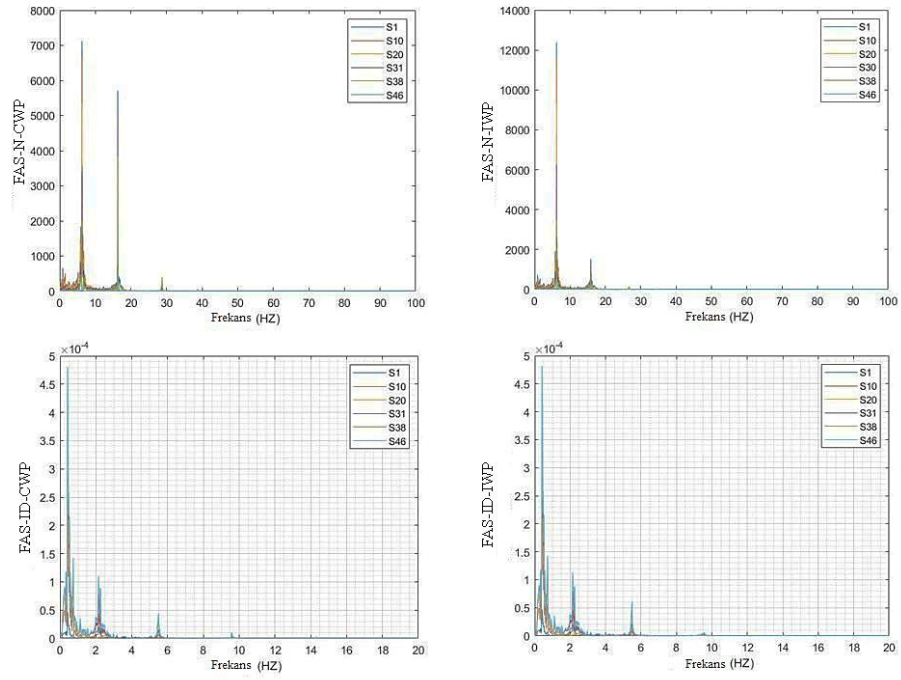
Açık ve kapalı çözüm tekniklerini kullanarak analiz edilen modellerin temel frekansları algılayabildiği tespit edilmiştir (Tablo 4 ve Şekil 7-10). Landers depremi sismik kayıtları etkisinde merkez perde duvar ve çerçeve sistem için Şekil 11 ve Şekil 12 'ye bakılabilir.



Şekil 7:
Merkez perde duvarda S1, S10, S20, S31, S38 ve S46. katlarda CWP ve IWP eğilme momenti ve kesme kuvveti için Fourier genlik spektrumları.

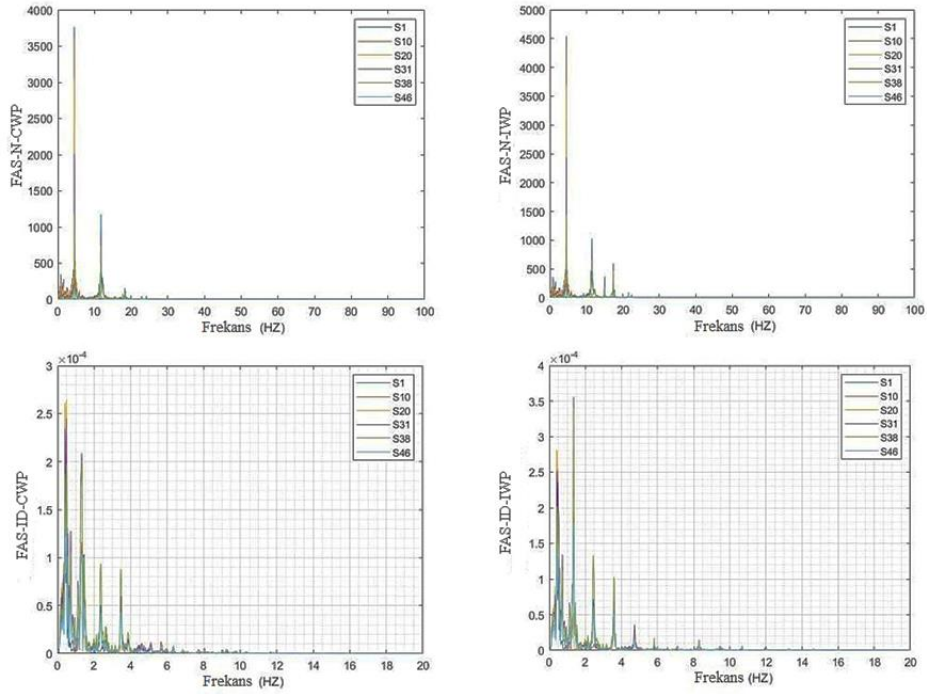


Şekil 8:
Çerçeve sistemde S1, S10, S20, S31, S38 ve S46. katlarda CWP ve IWP eğilme momenti ve kesme kuvveti için Fourier genlik spektrumları.



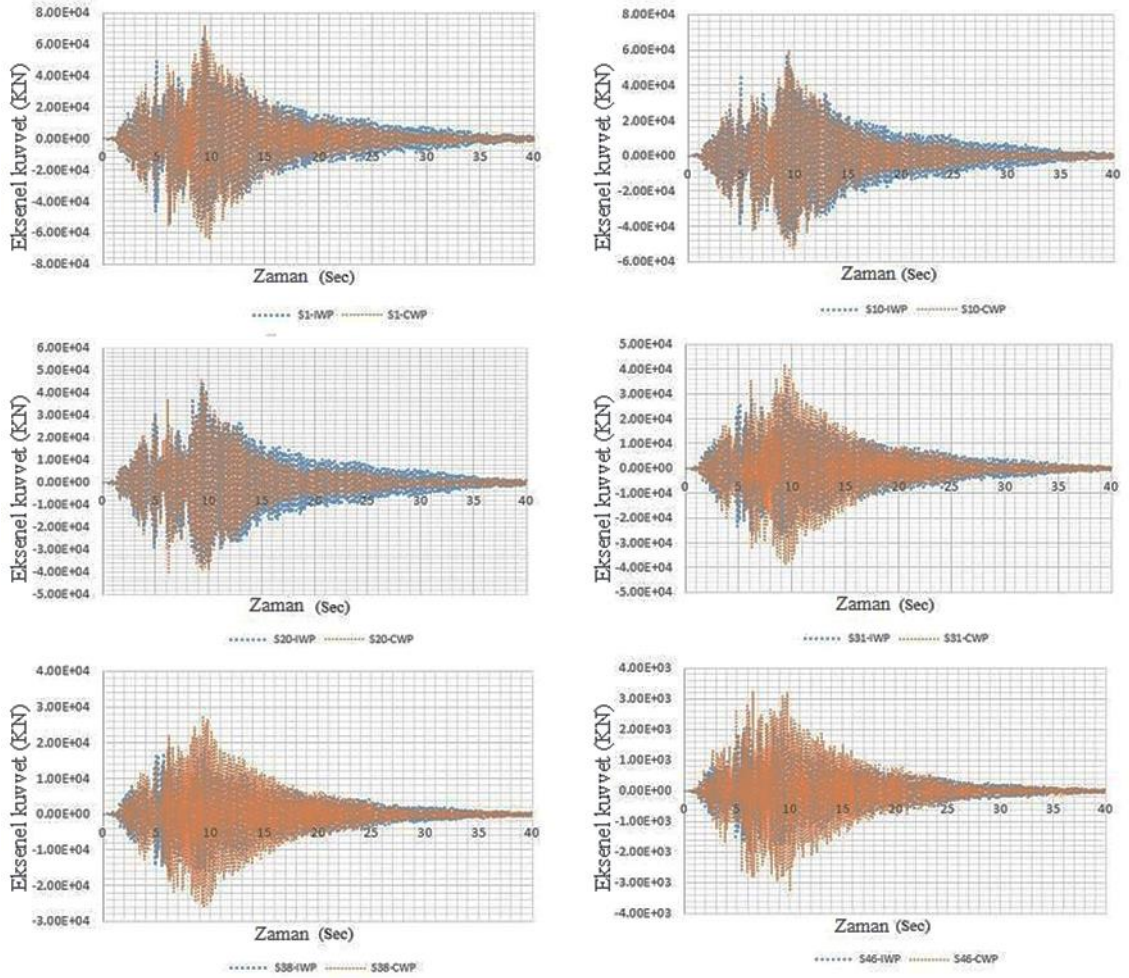
Şekil 9:

Çekirdek perde duvarda S1, S10, S20, S31, S38 ve S46 katlarda CWP ve IWP görel kat ötelenmesi ve normal kuvveti için Fourier genlik spektrumları.



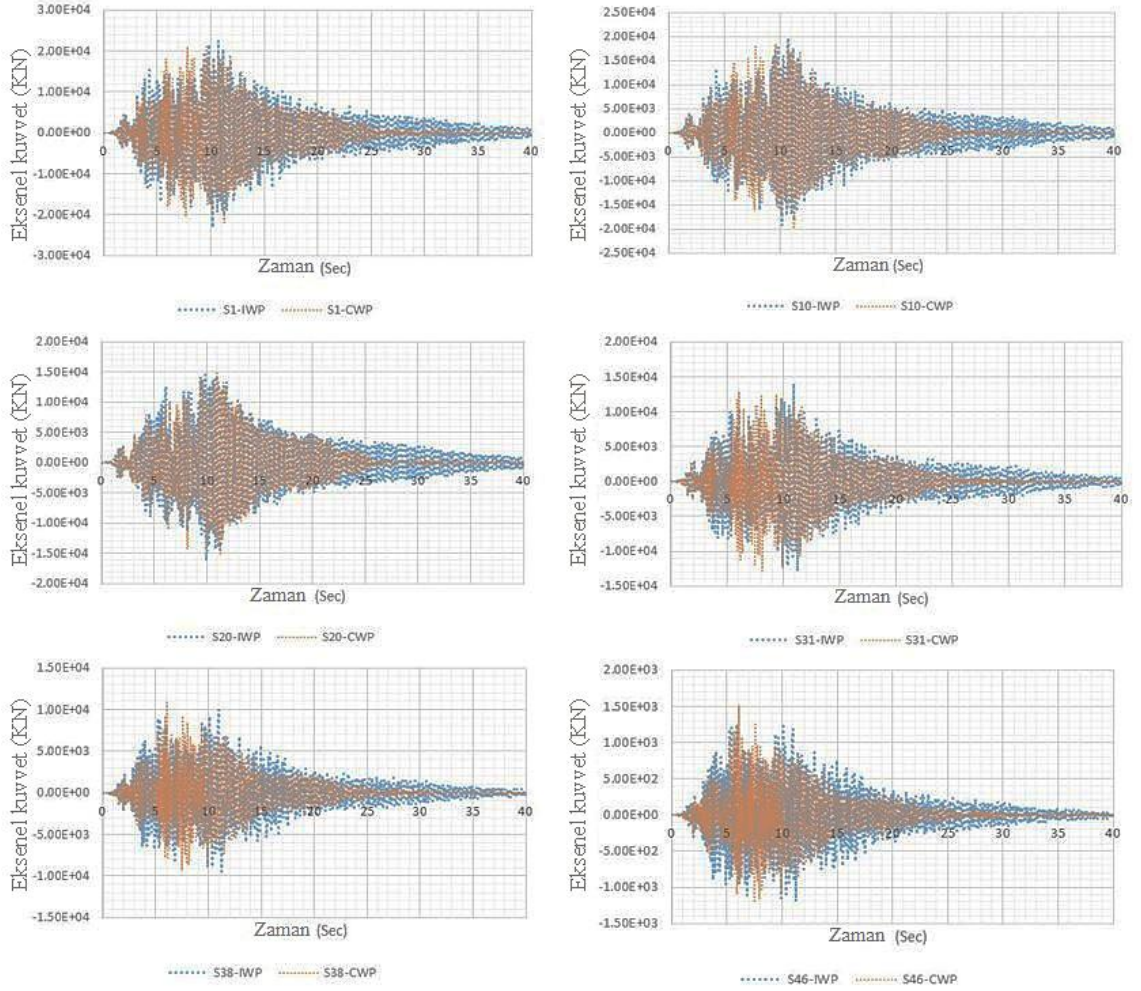
Şekil 10:

Çerçeve sistemde S1, S10, S20, S31, S38 ve S46 katlarda CWP ve IWP görel kat ötelenmesi ve normal kuvveti için Fourier genlik spektrumları.



Şekil 11:

Çekirdek duvarda S1, S10, S20, S31, S38 ve S46 katlarda CWP ve IWP normal kuvvetinin zamanla değişimi (Loma Prieta depremi düşey bileşen için).



Şekil 12:

Çerçeve sistemde S1, S10, S20, S31, S38 ve S46 katlarda CWP ve IWP normal kuvvetinin zamanla değişimi (Loma Prieta depremi dişey bileşeni için).

6. SONUÇLAR

Sismik dalga yayılmasının binalar üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla merkez perde duvarlı-çerçeve betonarme taşıyıcı sisteme sahip yüksek bir yapının dinamik tepkileri, dalga yayılımı ihmal edilerek ve dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmiştir. Bina taşıyıcı sisteminin elemanlarında meydana gelen normal kuvvet, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri belirlenmiştir. Dinamik davranış için Fourier genlik tepki spektrumları binanın farklı katlarında belirlenerek irdelenmektedir. Toplam 46 katlı olup analizlere konu olan merkez perde duvarlı ve çerçeve sistemli yapı yatay sismik dalgaya ve sabit tabanda yüksekliği boyunca dalgaya maruz kalmıştır.

1. Yüksek binaların tasarımında yatay ötelemler özellikle de görelî kat ötelemeleri çok önemli bir parametredir. Dalga yayılımı yüksek yapılar için dikkate alındığı zaman görelî kat ötelemesinde, kesme kuvvetinde ve eğilme momentinde az da olsa bir azalma meydana gelmektedir. Burada, yüksek binaların dinamik tepkisini belirlemek için dalga yayılımının dikkate alınmasının daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması açısından uygun olacağını belirtmekte yarar vardır.

2. Normal kuvvet değeri dalga yayılmasının dikkate alındığı durumda, özellikle merkez perde duvarın üst üçüncü çeyreklik kısmındaki katlarda önemli ölçüde artmaktadır. Çerçeve sistemin yüksekliği boyunca normal kuvvette az da olsa bir artış görülmüştür. Bu nedenle, klasik dinamik analizle, özellikle merkez duvar sistemi için normal kuvvet talebinin daha düşük olarak belirlendiği söylenebilir.
3. Dalga yayılmasının dikkate alınması, modellerin dinamik davranış analizlerinde görülen “beating” olayını etkilememektedir.
4. Yüksek binaların yapısal sağlık izlemesini gerçekleştirmek ve dinamik tepkileri değerlendirmek için dalga yayılımının kullanımındaki koşullara ilişkin yönlendirici kılavuzlar ve uyulması gerekli olan yönetmeliklerde ilgili kısımlar yazılmalıdır.
5. Açık çözümleme tekniğinde sönüm sorunu, yüksek frekansların yüksek modlarını doğru bir şekilde değerlendirmek için daha fazla çalışmanın yapılması gerekli olmaktadır.

Not: Bu makale Fikret MEHDİ'nin doktora tezinden türetilmiştir (Mehdi 2021)

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Fikret MEHDİ – Çalışma doktora tezinden türetilmiştir. Tüm modellemelerin ve analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların sunulması

Adem DOĞANGÜN _Tezin birinci danışmanı olup çalışmaların yönetilmesi ve sonuçların irdelenmesi

Yasin FAHJAN- Tezin ikinci danışmanı olup çalışmaların yönetilmesi ve sonuçların irdelenmesi

KAYNAKLAR

1. ALMahdi, F., Fahjan, Y., Doğangün, A. 2021. Critical remarks on Rayleigh damping model considering the explicit scheme for the dynamic response analysis of high rise buildings. *Advances in Structural Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1369433220988621>
2. 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. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.08.001>.
3. 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*, Springer: , 447–467. DOI: 10.1007/978-94-010-0696-5_31.
4. 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.
5. Kawakami, Hideji, Oyunchimeg, M. 2003. Normalized input-output minimization analysis of wave propagation in buildings. *Engineering Structures*, 25(11):, 1429–1442. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00103-2)
6. Kawakami, H, Oyunchimeg, M., Tingatinga, E. A. J. 2005. Analysis of earthquake wave propagation in buildings. *WIT Transactions on The Built Environment*.

DOI:10.2495/ERES050301.

7. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9, Dassault Systemes Simulia, Corp, United States, 2009.
8. Mehdi F. 2021. Dalga Yayılımının Yüksek Binaların Sismik Davranışına Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. (İkinci Danışman: Prof.Dr. Yasin FAHJAN)
9. M. Çelebi, S. F. Ghahari, E. Taciroglu. 2016, Significance of beating observed in earthquake responses of buildings, in: Conference: 16th US-Japan-NZ Workshop on the Improvement of Structural Engineering and Resiliency.
10. 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. DOI:10.1016/J.SOILDYN.2017.09.031.
11. 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. <https://doi.org/10.1785/0120130050>
12. 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. <https://doi.org/10.1785/0120120291>
13. PEERReport2013/24 2013. NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions.
14. Rahmani, M., Todorovska, M. I. 2014. 1D System identification of a 54-story steel frame building by seismic interferometry. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(4):, 627–640. <https://doi.org/10.1002/eqe.2364>
15. Safak, E. 1998a. New approach to analyzing soil-building systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7–8):, 509–517. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00007-4).
16. Şafak, E. 1998b. Propagation of seismic waves in tall buildings. *The Structural Design of Tall Buildings*, 7(4):, 295–306. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1794\(199812\)7:4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1794(199812)7:4).
17. 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))
18. Todorovska, Marija I, Lee, V. W., Trifunac, M. D. 1988. Investigation of earthquake response of long buildings, University of Southern California, Department of Civil Engineering.
19. Todorovska, M. I., Ivanovic, 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. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00004-5)
20. Westergaard, H. M. 1933. Earthquake-shock transmission in tall buildings. *Eng. News-Rec*, 111.22:, 654–656.