

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK YAPILARIN SİSMİK KUVVETLER ETKİSİ ALTINDA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ: ENDÜSTRİYEL DEPO
RAF SİSTEMLERİ İÇİN BİR UYGULAMA

UYGAR KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK YAPILARIN SİSMİK KUVVETLER
ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ: ENDÜSTRİYEL DEPO RAF
SİSTEMLERİ İÇİN BİR UYGULAMA**

UYGAR KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ AHMET ANIL DİNDAR

GEBZE

2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**BEHAVIOR OF STEEL STRUCTURES UNDER THE
EFFECT OF SEISMIC FORCES INVESTIGATION:
AN APPLICATION FOR INDUSTRIAL WAREHOUSE
RACKING SYSTEMS**

UYGAR KAYA

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING PROGRAM**

**THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. AHMET ANIL DİNDAR**

GEBZE

2023

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 30/01/2023 tarih ve 2023/07 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/02/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Uygur KAYA'nın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl DİNDAR

ÜYE

: Doç. Dr. Onur ŞEKER

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç TAŞKIN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Endüstriyel depo raf sistemleri, ürün depolama ve lojistik sektöründe çok büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu sistemlerinin oluşturulmasında hafiflik, toplu üretim, yüksek mukavemet gibi avantajları sebebi ile soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profiller tercih edilmektedir. Ancak bu profillerin et kalınlıklarının 0.1 mm ile 6.4 mm arasında olması ve akma dayanımlarının 230 MPa ile 380 MPa arasında değişmesi bu sistemlerin yapısal dayanımlarının önemini arttırmakta ve sistemde taşıyıcı görevi gören profiller için birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir.

Bu araştırma ile sismik kuvvetlerin İstanbul, Tuzla'da yer aldığı varsayılan bir endüstriyel depo raf sisteminin sismik kuvvetler etkisi altındaki davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile ele alınmıştır.

Çalışma süresince bir sonlu eleman programı olan Abaqus ile Python yazılım dili birbirleri ile etkileşimli bir şekilde kullanılmıştır. Bu bağlamda yapı bilgisayar ortamında modellenerek yapıya spektrum ivme değerleri 1 ile 6 arasında ölçeklendirilmiş deprem kayıtları etkililmiş, zaman-tanım analizinden sonra artırımlı dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Artırımlı dinamik analiz sonuçları olarak yapıda doğrusal olmayan davranış gözlemlenmiş ve enerji yayılım grafikleri hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Depo Raf Sistemi, Abaqus, Artırımlı Dinamik Analiz, Doğrusal Olmayan Davranış, Enerji Yayılımı.

SUMMARY

Industrial warehouse racking systems (IWRS) are of great importance in the product storage and logistics industry. Cold-formed thin-walled steel profiles are preferred due to their advantages such as lightness, mass production and high strength in the creation of these systems, which are widely used today. However, the fact that the wall thicknesses of these profiles are between 0.1 mm and 6.4 mm and the yield strengths vary between 230 MPa and 380 MPa increase the importance of the structural strength of these systems and bring along some problems for the profiles that act as carriers in the system.

In this research, the behavior of an industrial warehouse racking system assumed to be located in Tuzla, Istanbul, under the influence of seismic forces, is discussed with the finite element method.

During the study, Abaqus, a finite element program, and Python software language were used interactively with each other. In this context, the structure was modeled in the computer environment, and earthquake records whose spectrum acceleration values were scaled between 1 and 6 were affected, and after the time-history analysis, incremental dynamic analysis was performed. As the results of incremental dynamic analysis, nonlinear behavior in the structure was observed and energy dissipation graphs were prepared.

Key Words: Pallet Rack Systems, Abaqus, Incremental Dynamic Analysis, Nonlinear Behavior, Energy Dissipation.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca desteğini ve bilgisini hiç esirgemeyen, tecrübe ve birikimi ile bu çalışmanın oluşmasına zemin hazırlayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl DİNDAR’a,

Ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım..



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması ve Önceki Çalışmalar	5
1.2. Tezin Amacı, Kapsamı ve İçeriği	6
2. ARAŞTIRMA NESNESİ: ENDÜSTRİYEL DEPO RAF SİSTEMLERİ	10
2.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik	10
2.2. Endüstriyel Depo Raf Sistemleri	12
3. YÖNTEM	16
3.1. Hesaplama Yöntemleri ve Kullanılan Programlar	16
3.2. Tasarım ve Kullanılan Veriler	18
3.2.1. Endüstriyel Depo Raf Sisteminin Modellenmesi	18
3.2.2. Malzeme Modelinin Oluşturulması	20
3.2.3. Yükler ve Sınır Koşulları	23
3.2.4. Mesh (Ağ Örgüsü)	25
3.3. Çalışmanın Doğrulanması	26
3.3.1. Modal Analiz	26
3.3.2. Zaman-Tanım Alanında Analiz	28
4. ANALİZLER VE SAYSISAL HESAPLAMALAR	30
4.1. Doğrusal Olmayan Zaman-Tanım Alanında Analiz	30
4.1.1. Sönüm	31
4.1.2. Analiz Sonuçları	32
4.2. Artırımlı Dinamik Analiz	38

4.2.1. U1 Yönündeki Görelî Kat Öteleme Oranları İçin Artırîmlî Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri	38
4.2.2. U3 Yönündeki Görelî Kat Öteleme Oranları İçin Artırîmlî Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri	40
4.2.3. U1 Yönündeki Taban Kesme Kuvveti İçin Artırîmlî Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri	42
4.2.4. U3 Yönündeki Taban Kesme Kuvveti İçin Artırîmlî Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri	42
4.3. Plastik Enerji Yayılımı	43
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	60
5.1. Sonuçların Yorumlanması	61
5.2. Sonuçlar ve Çıkarımlar	64
5.3. Gelecek Çalışmalar	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

E	: Elastisite modülü
F_{tu}	: Maksimum çekme mukavemeti
F_{ty}	: Akma dayanımı
ε	: Şekil değiştirme
ε_{max}	: Kopma noktasındaki şekil değiştirme
ε_{us}	: Üniform şekil değiştirme
n	: Ramberg-Osgood katsayısı
σ	: Gerilme
M	: Kütle
a	: İvme
C	: Sönüm
v	: Hız
K	: Rijitlik
u	: Deplasman
F	Kuvvet
α	Alfa katsayısı
β	Beta katsayısı
ξ	Sönüm oranı
T	Periyot
BC	Sınır Koşulları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>		<u>Sayfa</u>
1.1:	Endüstriyel depo raf sistemleri için bir örnek.	1
1.2:	Endüstriyel depo raf sisteminin bulunduğu konum.	7
1.3:	Tez çalışmasının strüktürü ve bölümlerin birbirleriyle olan bağı.	8
2.1:	Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı profillerden oluşan bir yapı örneği.	11
2.2:	Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profiller.	12
2.3:	Endüstriyel depo raf sistemlerini oluşturan yapı elemanları.	13
2.4:	Paletli depo raf sistemlerine bir örnek.	14
3.1:	Abaqus programının arayüzü.	17
3.2:	Sonlu Elemanlar Yöntemi analizlerine genel bir bakış.	18
3.3:	Yapının üç boyutlu görüntüsü.	20
3.4:	Yapıda kullanılan profillerin kesitleri.	20
3.5:	Malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.	22
3.6:	Sınır koşulları ve yapıya etkiyen yükler..	23
3.7:	Sırasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu mesh çeşitleri.	26
3.8:	Mesh elemanlar ile satılmış bir şekil.	26
3.9:	Tacoma Narrows Köprüsü'nün yıkılması.	27
3.10:	SAP2000 ve Abaqus programlarında gerçekleştirilen lineer davranış için analizlerin karşılaştırılması.	29
3.11:	SAP2000 ve Abaqus programlarında gerçekleştirilen doğrusal olmayan davranış için analizlerin karşılaştırılması.	29
4.1:	Sisteme etkitilen 1 ve 2 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.	33
4.2:	Sisteme etkitilen 3 ve 4 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.	34
4.3:	Sisteme etkitilen 5 ve 6 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri	35
4.4:	Sisteme etkitilen 7 ve 8 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri	36

4.5:	Sisteme etkitilen 9 ve 10 numaralı deprem kayıtlarının ye r	37
	değiştirme ve taban kesme değerleri	
4.6:	Görelı kat öteleme oranının U1 yönündeki IDA grafiği.	40
4.7:	Görelı kat öteleme oranının U3 yönündeki IDA grafiği.	41
4.8:	Taban kesme kuvvetlerinin U1 yönündeki IDA grafiği.	42
4.9:	Taban kesme kuvvetlerinin U3 yönündeki IDA grafiği.	43
4.10:	Spektral ivmesi 2 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	45
	yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.11:	Spektral ivmesi 2 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	46
	yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.12:	Spektral ivmesi 2 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	47
	yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.13:	Spektral ivmesi 3 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	48
	yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.14:	Spektral ivmesi 3 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	49
	yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.15:	Spektral ivmesi 3 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	50
	yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.16:	Spektral ivmesi 4 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	51
	yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.17:	Spektral ivmesi 4 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	52
	yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.18:	Spektral ivmesi 4 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	53
	yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.19:	Spektral ivmesi 5 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	54
	yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.20:	Spektral ivmesi 5 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	55
	yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.21:	Spektral ivmesi 5 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	56
	yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	
4.22:	Spektral ivmesi 6 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının	57
	yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	

4.23:	Spektral ivmesi 6 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	58
4.24:	Spektral ivmesi 6 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.	59
5.1:	Spektral ivmesi 2 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.	61
5.2:	Spektral ivmesi 3 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.	61
5.3:	Spektral ivmesi 4 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.	62
5.4:	Spektral ivmesi 5 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.	63
5.4:	Spektral ivmesi 6 ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.	63

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Plastik malzeme özellikleri.	22
3.2: Deprem kayıtlarına genel bir bakış.	24
4.1: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkitilen yönleri.	32
4.2: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkitilen yönleri.	39
4.3: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkitilen yönleri.	41

1. GİRİŞ

Günümüzde ülkeler arasındaki ticari sınırların ortadan kalkması, internetin her alanda yaygın olarak kullanılması, tüketicilere sunulan ürün ve hizmet çeşitliliğinin artması gibi faktörler lojistik sektörünün kazandığı önemi vurgulamaktadır. Lojistik sektörü içinde nakliye, envanter, tedarik ve malzeme idaresi gibi birçok temel faaliyet bulunmakla birlikte depolama, bu faaliyetler içinde en önemli konuma sahip olanıdır. Depo alanlarının yeterli derecede düzenli, erişilebilir olması ve etkin şekilde yönetilebilmesi, maliyetlerin düşmesine ve verimliliğin önemli ölçüde artmasına yardımcı olmakla birlikte bu alanların "ulaşılabilirlik ve sevk edilebilirlik" temelinde, hareket özelliklerine uygun bir yerleşim düzeninin içerisinde yer alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu bağlamda endüstriyel depo raf sistemleri; bu ihtiyaçlara cevap veren, lojistik sektörü ile birlikte çeşitli endüstriyel sektörlerde genellikle depo alanlarında kullanılan, kısıtlı bir depo alanını maksimum verimle kullanmayı sağlayıp istiflemeyi düzenli bir hale getirmek ve çevresel etkilerden korunmak için geliştirilmiş, ince cidarlı profillerden oluşan çelik konstrüksiyonlardır.



Şekil 1.1: Endüstriyel depo raf sistemleri için bir örnek.

Ankraj cıvataları, taban plakası, raf bölmesi, raf kirişi, kiriş braket, çapraz bağlantı, raf desteği, kolon, kolon koruması, döşeme levhası, palet, palet durdurucu, palet destek çubukları gibi yapı elemanlarının bir araya gelmesiyle oluşan bu sistemler kullanım türüne, ihtiyaca ve kurulacak alana göre pek çok farklı çeşitliliğe sahiptir.

Hafiflik, toplu üretim, yüksek mukavemet, kolay kurulum, kalıp işçiliğinin gerekmemesi gibi avantajlar sebebi ile zamandan, kaynaktan, maliyetten tasarruf imkânı sunan ve bu sebeple oldukça yaygın bir şekilde kullanılmakta olan endüstriyel depo raf sistemleri temel olarak ağır yük raf sistemleri ve hafif yük raf sistemleri olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan sistemler ise paletli depo raf sistemi (Pallet Racking System), katlı raf sistemi (Mezzanine Storey Rack System) içine girilebilir depo raf sistemi (Drive-In Racking System), sırt sırta depo raf sistemidir (Back-to-Back Racking System).

Sanayileşmenin doğal bir sonucu olarak artan endüstriyel faaliyetler iş güvenlik önlemlerini artırırken, patlayıcı maddelerin, gazların, yanıcı sıvıların, oksitleyici maddelerin, zehirleyicilerin ve radyoaktif maddelerin reaksiyon vermeyecek şekilde sınıflandırılması ve bu sınıflara uygun olarak depolanması, depolanan yerlerin güvenliği birtakım prosedürlere uygun olarak tasarlanmasını da zorunlu kılmıştır.

Bunula birlikte esasen çeşitli depremlere maruz kalmış ülkelerde oluşan can kayıpları, sosyo-ekonomik ve toplumsal etkileri bakımından en fazla etkilenen ülkelerden birisinin de hem Avrasya levhası hem de Arap levhası ile Afrika levhası arasında yer almasından, ayrıca kendi sınırları içinde Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu Fay Hattı arasında, deprem kuşağında olmasından ötürü sismik olarak oldukça aktif bir ülke olmasından ötürü Türkiye olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yaşanmış olan depremler sonucunda, yapılarda meydana gelen yapısal hasarlar incelendiğinde bu hasarların başlıca nedeninin, yapının tasarım ve uygulama aşamalarındaki hatalardan kaynaklandığı görülmektedir. Bu sebeple endüstriyel depo raf sistemlerinin tasarımında yapısal dayanımlar ve deprem veya rüzgâr yükü gibi dinamik yükler etkisi altındaki davranışların incelenmesi gibi konular öne çıkmaktadır.

Sistemi oluşturan soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profillerinin et kalınlıklarının 0.4 mm ile 6.4 mm arasında değişmesi [1], akma dayanımlarının 230 MPa ile 380 MPa arasında olması endüstriyel depo raf sistemlerinin tasarımlarını gökdelen, hangar, sanayi yapıları, spor kompleksleri gibi yapıların tasarımından ayıran başlıca farklılıklardır.

Bu sistemlerin tasarımındaki asıl amaç ise sistemin kendi ağırlıklarını aşan yükleri taşımayı amaçlamaktır [2].

Kullanım türüne, depolama alanına ve ihtiyaca göre şekillenen ancak tasarımsal anlamda yatay ekseninde çaprazlı veya çaprazsız olarak ikiye ayrılan bu sistemlerin yük altındaki tasarımları için Türkiye’de,

- TS EN 15878- Çelik Statik Depolama Sistemleri - Terimler ve Tarifler,
- TS EN 15512- Çelik Statik Depolama Sistemleri - Ayarlanabilir Palet Raf Sistemleri - Yapısal Tasarım Kuralları,
- TS EN 16691- Çelik Statik Depolama Sistemleri - Ayarlanabilir Palet Raf Sistemleri – Deprem İçin Tasarım Kuralları

isimli standartlar bulunmaktadır. Dünyada ise bu amaçla yaygın olarak kullanılan bazı kaynaklar şunlardır:

- FEMA 460 Seismic Considerations For Steel Storage Racks Located In Areas Accessible To The Public,
- ANSI MH16.1: 2012 Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks,
- CSN EN 16681 Steel Static Storage Systems - Adjustable Pallet Racking Systems - Principles for Seismic Design,
- AISI S-100, Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members,
- RMI, Rack Manufacturer Institute 2008, Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks,
- FEM 10.2.08, The Seismic Design of Static Steel Pallet Racks.

Bu kaynaklara göre depreme dayanıklı yapı tasarımının genel prensipleri; hafif şiddetteki depremlerde binalarda yapısal veya yapısal olmayan elemanlarda hasar oluşmaması, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir kalması, yüksek şiddetli depremlerde ise can güvenliğini sağlamak için kalıcı yapısal hasar oluşumunu sınırlamak olarak değerlendirilebilir.

Ek olarak depreme dayanıklı yapı tasarımı; depremlerin yaygın olduğu bölgelerde yapısal tasarım, deprem mühendisliği veya yapısal değerlendirme ve güçlendirme sürecinin bir parçasıdır. Bu tasarım yöntem olarak beş kategoriye ayrılabilir. Bunlar:

- Eşdeğer deprem yükü analizi,
- Tepki spektrumu analizi,
- Lineer dinamik analiz,
- Doğrusal olmayan statik analiz,
- Doğrusal olmayan dinamik analizdir.

Yapıya etkiyen statik veya dinamik yüklerin, yüklerin etkisi kaldırıldığında orijinal boyutuna ve şekline geri dönme yeteneğine lineer elastisite (doğrusal davranış), tepki olarak geri dönüşü olmayan bir şekil değişikliğine, kalıcı deformasyona uğrama yeteneğine ise plastisite (doğrusal olmayan davranış) denilmektedir.

Zaman-tanım alanı analizi, belirtilen zaman fonksiyonuna göre değişebilen yükleme altındaki dinamik yapısal tepkinin doğrusal veya doğrusal olmayan değerlendirmesini sağlar. Bu sebeple yapı davranışının en gerçekçi şekilde incelendiği analiz olarak tanımlanır. Artırımlı dinamik analiz ise zaman-tanım alanı analizinin bir alt kümesi olup yapıların sismik yükler altındaki davranışının kapsamlı bir değerlendirmesini yapmak için deprem mühendisliğinin hesaplamalı bir analiz yöntemidir. Her biri çeşitli sismik yoğunluk seviyelerine göre ölçeklendirilmiş bir dizi yer hareketi kaydı altında bir yapısal modelin birden çok doğrusal olmayan dinamik analizini gerçekleştirmeyi içerir. Bir yapının karşı olduğu sismik riski tahmin etmek için olasılıksal sismik tehlike analizinin sonuçlarına dayanmak üzere geliştirilmiştir. Statik itme analizinin dinamik eşdeğeri olarak kabul edilebilir.

Bu bağlamda yukarıda bahsedilen kaynaklar dışında endüstriyel depo raf sistemlerinin deprem kuvveti gibi dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi hakkında çeşitli kaynaklar bulunmaktadır.

1.1. Literatür Araştırması ve Önceki Çalışmalar

Cheng and Wu (2015), depo raf sistemlerini aşağı koridor yönünde bulunan çapraz elemanlar vasıtası ile tek girişli raf ve çift girişli raf olarak isimlendirerek ikiye ayırmış, bu sistemlerde destek ve raf kolonlarını birbirine bağlayan destek braketi bağlantısı bölgesinde deformasyonun meydana geldiğini belirtmiştir. Buna istinaden dört farklı statik yükleme testi ile tek girişli rafların nihai taşıma kapasitesini sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamış, benzer simülasyon yöntemini çift girişli raflar için kullanmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Bu bağlamda deneysel sonuçlar, rafların dikey omurga çaprazlama sisteminde, çapraz bağlantının yerel deformasyonunun çapraz elemanından daha büyük olduğunu ve çapraz bağlantının taşıma kapasitesinin çapraz elemanından daha az olduğu sonucuna varmıştır [3].

Branquiniho, Luiz, Malite (2019), çaprazsız depo raf sistemlerdeki yapısal analizin burkulmayı ele aldığını belirterek sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması ile yapı elemanlarının kiriş eleman ve kafes eleman olarak modellenmesi ile daha doğru sonuçlar elde edileceğini öne sürmüştür [4].

Elkadi (2019), depo raf sistemlerindeki kolonların ve kirişlerin birleşim noktalarında cıvatasız, kancalı bir detayın kullanıldığını belirterek bu birleşim detayının deprem kuvveti etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışlarını incelemiştir. RMI 2012 Specification [ANSI MH16.1:2012. Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Rack Manufacturers Institute (RMI)], Bölüm 9.6' ya göre endüstriyel depo raf sistemlerine ait iki farklı kolon, kiriş birleşim detayı hazırlanarak bir test düzeneği oluşturmuştur. Bu birleşim detayında yer alan kirişlerin uç kısımlarına zaman-deplasman serisi etkililerek endüstriyel depo raf sistemine ait moment-dönme grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra test sonuçlarının sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması adına ANSYS programı kullanılarak yapı modellenmiş ve birleşim detayında yer alan kirişlerin uç kısımlarına test düzeneğindeki aynı zaman-deplasman serileri etkililerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. ANSYS'den elde edilen moment-dönme eğrilerinin deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir [5].

Kumar, Ramesh (2019), endüstriyel depo raf sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında için bir sonlu eleman

programı olan ANSYS kullanılmış olup depo raf sistemlerinin sonlu elemanlar analizi için modellenmesinde karmaşık geometrileri temsil etme rijitliğine ve düğüm noktalarına yarı rijit davranış ekleme, yerel burkulma ile eğilme etkilerinin hesaba katılmasının önemini vurgulamışlardır [6].

Jaradat (2020), deprem kuvvetleri etkisi altında tek eksenli endüstriyel depo raf sistemlerinin davranışını incelemiştir. Bu çalışmada kancalı birleşim ve pimli birleşim olarak ikiye ayırdığı birleşim detaylarına sahip olan endüstriyel depo raf sistemini bir sonlu elemanlar programı olan Abaqus'te modelleyerek birtakım deprem kayıtlarını ölçeklendirmiş, yapıya etkitmiş ve artırımlı dinamik analiz yapmıştır. Bu analizler sonucunda kırılma eğrisi hazırlamış ve en yüksek yer ivmesi değerinin bulunduğu bir deprem kaydının yapıya hangi şiddette hasar verebileceğini gösteren bir çalışma hazırlamıştır [7].

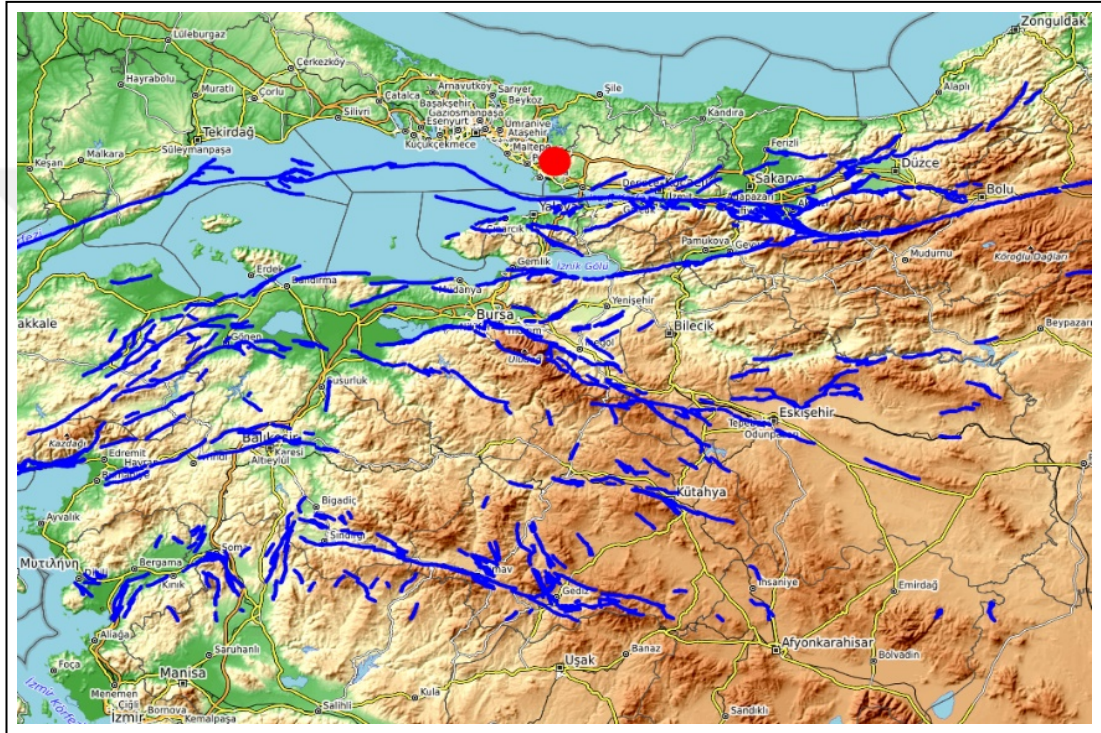
Literatürde yapılan tüm bu araştırmalar sonucunda yapının doğru modellenmesi ve sonlu elemanlar bağlamında bilgisayar programlarının kullanılması ile birlikte zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak daha etkili sonuçlar vereceği kanısına varılmıştır. Literatürde endüstriyel depo raf sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi önderliğinde, Abaqus, SAP2000 programlarının ve Python yazılım dilinin imkanları doğrultusunda incelenmesi, analiz edilmesi ve çıkarımlarda bulunulması hususunda bir çalışma alanı boşluğu bulunmaktadır. Yeni, özgün ve çoklu yöntemlerin; gündelik hayatın lojistiği için elzem bir yapı olan endüstriyel depo raf sistemleri üzerinde denenmesi ile varılabilecek potansiyel sonuçların zenginliğine inanarak, bu tez çalışması sismik kuvvetler etkisi ile endüstriyel depo raf sistemlerindeki enerji yayılımının sonlu elemanlar programları aracılığıyla incelenmesini amaçlamaktadır.

1.2. Tezin Amacı, Kapsamı ve İçeriği

Literatür araştırmasından hareketle ve çalışma alanı boşluğundan yola çıkarak yeni bir bilimsel bilgi üretebilmek adına endüstriyel depo raf sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile ve harmanlanmış bilgisayar programlarının tekniği ile ele alınması bu tez çalışmasının temel amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ticaret, lojistik, depolama, tedarik için elzem bir yapı olan endüstriyel depo raf sistemlerinin, belirli parametrelerin gerçekliği ışığında; sismik yükler altındaki davranışı, dayanımı,

enerji yayılımlarının ortaya konulması, hem araştırma nesnesi olan endüstriyel depo raf sistemlerine dair hem de çalışmanın özgün metodolojisine dair çıkarımlarda bulunmayı hedeflemektedir.

Bu tez çalışmasında URGO Logistics Equipment Co. Ltd. tarafından tasarlanan bir depo raf sisteminin; önemli deprem kuşaklarından birisinin çok yakınında yer alması ve Türkiye ölçeğinde lojistik gücü sebebiyle Tuzla, İstanbul bölgesinde, 40.887125, 29.378482 koordinatlarında yer aldığı varsayılmıştır.



Şekil 1.2: Endüstriyel depo raf sisteminin bulunduğu konum.

Abaqus programında 3D olarak modellenen yapıya yapının yatay ekseninde, diğer bir adıyla down-aisle, ve düşey ekseninde, diğer bir adıyla cross-aisle, yönlerinde eş zamanlı olarak yapıya etkitilen 22 ayrı deprem kaydı analiz sayısının fazla olması sebebi ile Python programlama dili yardımıyla etkitilmiştir. Böylelikle deprem ve yapı mühendisliği çalışmaları altında çoklu bir yöntem denenmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir.

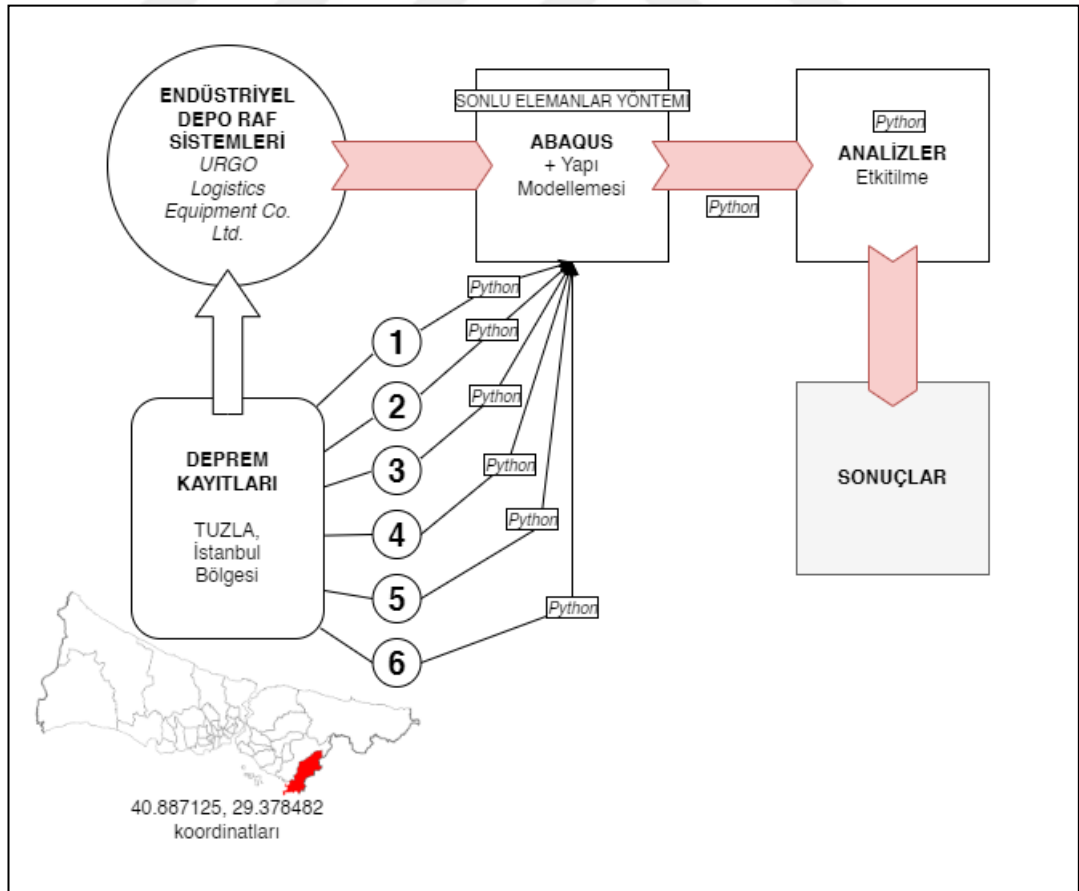
Etkitilen bu deprem kayıtlarının spektral ivme değerleri, yapıların sismik yükler altındaki davranışının kapsamlı bir değerlendirmesini yapmak için yaygın olarak kullanılan ve zaman-tanım alanı analizinin bir alt kümesi olan artırımlı dinamik analiz için 1 ile 6 arasında ölçeklendirilmiştir. Yapıda doğrusal olmayan davranışların

gözlenmesi ile birlikte tepe deplasman değerleri, taban kesme kuvvet değerleri ve plastik enerji dağılım grafikleri hazırlanmış, bu değerlerin yapı elemanlarına etkileri araştırılmıştır.

Bu tez çalışması giriş, araştırma nesnesinin tanımı, yöntem, analizler ve sonuçlar ile tartışma olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Yöntem bölümü, ön süreci kapsamaktadır. Ön süreç bölümünde, hesaplama yöntemleri, çalışma sırasında kullanılan programlar, sistemi oluşturan elemanlar ve sistemin tasarımı, malzeme modeli, yük çeşitleri, yükler, sınır koşulları, kullanılan deprem kayıtları, mesh elemanları, çalışmanın doğrulanması ayrıntılı olarak belirtilmiştir.

Analiz bölümü sürecin uygulanmasını içermektedir. Analiz bölümünde lineer olmayan zaman alanı, artımlı dinamik analiz ve enerji dağılım grafiklerinden bahsedilmiş ve analiz sonuçları eklenmiştir.

Analiz sonrası bölümünde ise süreç sonrasını kapsamaktadır. Bu analizler hakkında bazı çıkarımlarda bulunulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalardan bahsedilmiştir.



Şekil 1.3: Tez çalışmasının strüktürü ve bölümlerin birbirleriyle olan bağı.

Tez çalışmasının giriş, araştırma nesnesi, yöntem, analizler ve sonuçlar olmak üzere kurgulanan strüktürü Şekil 1.3’te yer alan diyagramda birbirleriyle olan ilişkileri gösterilecek şekilde aktarılmıştır.



2. ARAŞTIRMA NESNESİ: ENDÜSTRİYEL DEPO RAF SİSTEMLERİ

Sanayi Devrimi'ni takiben küreselleşmenin de etkisiyle gücünü artıran teknoloji, iletişim ve ticaret alanlarındaki birbiri ardına gelişmeler ve ülkeler arasındaki ticari sınırların ortadan kalkması; pazarlamanın uluslararası hale dönüşmesini sağlamakla birlikte lojistik sektörünün önemini de vurgular hale gelmiştir. Bu nedenle; üretilen ürünlerin güvenli bir şekilde ulaşımının sağlanması ve depolanması, günümüzde oldukça elzem pozisyonudadır. Lojistik sektörünün en önemli alt kümelerden birisi olan depolama; hammadde, yarı ürün-mamul, bitmiş ürün-mamul ve yardımcı diğer sarf malzemelerinin depolardaki ve dağıtım merkezlerindeki tüm işlevlerini içeren bir kavram olarak tanımlanmakta ve gündelik hayatın fonksiyonlarının devamı için gereklilik taşımaktadır.

Depo yönetimi ise, depo alanlarının yeterli derecede düzenli, erişilebilir olması ve etkin şekilde yönetilebilmesi, sınırlı depo alanının yüksek verimlilikle kullanılması, depolanan ürünlerin güvenliği, "ulaşılabilirlik ve sevk edilebilirlik" temelinde, hareket özelliklerine uygun bir yerleşim düzeninin içerisinde yer alacak şekilde tasarlanması konularını ele alır. Bu bağlamda endüstriyel depo raf sistemleri; bu ihtiyaçlara cevap veren, lojistik sektörü ile birlikte çeşitli endüstriyel sektörlerde genellikle depo alanlarında kullanılan, kısıtlı bir depo alanını maksimum verimle kullanmayı sağlayıp istiflemeyi düzenli bir hale getirmek ve çevresel etkilerden korunmak için geliştirilmiş yapılardır. Bu yapılar; montaj, üretim, süneklik, rijitlik bağlamlarında etkili bir malzeme olması sebebiyle soğuk haddelenmiş ince cidarlı profillerden oluşan çelik konstrüksiyonlardır. Buradan hareketle çelik malzemenin özelliklerinden yola çıkarak endüstriyel depo raf sistemlerinin yapısal karakterini incelemek elzemdir.

2.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik

Yapı çeliği üretim olarak sıcak şekillendirilmiş ve soğuk haddelenmiş çelik olarak ikiye ayrılır. Çeliğin yüksek sıcaklıklarda eritilip kalıba dökülmesi, ardından soğuması işlemi sıcak şekillendirme aşamasını oluşturmaktadır. Soğuk haddelenmiş çelik ise birtakım plakaların istenen boyut ve şekle ulaşana kadar preslenmesi ve haddelenmesini temsil etmektedir.

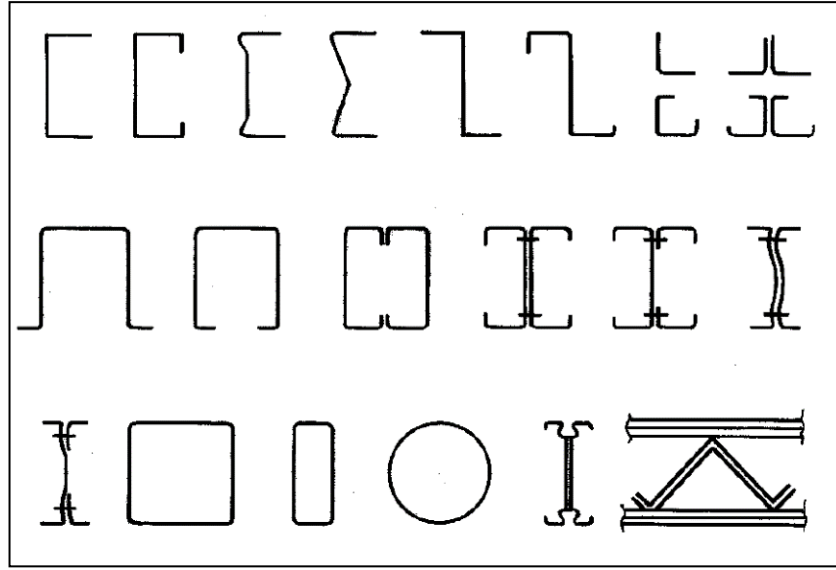
Soğuk şekillendirilmiş çelik, inşaat sektöründeki diğer bir adıyla ince cidarlı çelik elemanlar, 1950'li yıllardan itibaren popülaritesini arttıran; otomobillerde, endüstriyel ürünlerde, tren vagonlarında, depo raf sistemlerinde kullanılan bir yapı malzemesidir. İnşaat sektöründe yapısal ve yapısal olmayan çelik elemanlar soğuk şekillendirilmiş elemanlardan oluşturulur. Bu yapı malzemeleri kolonları, kirişleri, çapraz elemanları, zemin döşemelerini, inşa edilmiş bölümleri ve diğer bileşenleri oluşturur. Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profillerinin et kalınlıklarının 0.4 mm ile 6.4 mm arasında değişmesi [1], akma dayanımlarının 230 MPa ile 380 MPa arasında olması sıcak şekillendirilmiş çeliğe göre arasındaki başlıca farklardır.

Dünyada soğuk haddelenmiş çeliğin kullanılması ile oluşturulan sanayi yapıları, endüstriyel depo raf sistemleri, az katlı binalar gibi Şekil 2.1'de de görülebileceği üzere birçok yapı örneği bulunmaktadır.



Şekil 2.1: Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı profillerden oluşan bir yapı örneği.

Yapıların tamamının bu profillerden oluşturulabileceği gibi yalnızca bazı yapı elemanları, çatı panelleri veya döşemeler de bu elemanlardan oluşabilir. Bu tür tasarımlarda kolon ve kiriş gibi yapı elemanları kesit olarak C kesit, I kesit, T kesit, Z kesit, omega kesit, kutu profil, dairesel profil vb. olarak Şekil 2.2'de gösterildiği üzere yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 2.2: Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profiller.

Bu profillerin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan avantajları ise:

- Hafiflik,
- Yüksek dayanım ve rijitlik,
- Üretim kolaylığı,
- Montaj kolaylığı ve kalıp işçiliğinin gerektirmemesi,
- Daha doğru detaylandırma,
- Ortam sıcaklıklarına karşı dayanım

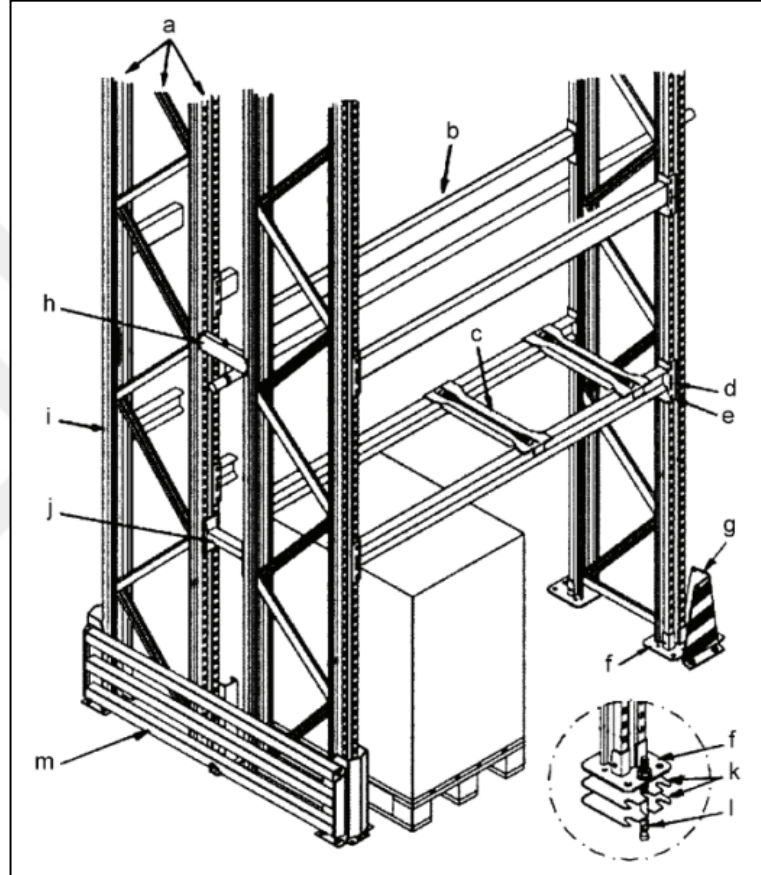
şeklinde özetlenebilir. Bu profillerin karakteristik avantajları ve kesit özellikleri; endüstriyel depo raf sistemlerinde de kullanılabilirliğini imkanı hale getirmektedir.

2.2. Endüstriyel Depo Raf Sistemleri

Endüstriyel depo raf sistemleri, işletmelere azami istifleme ve depolama alanı oluşturarak deponun maksimum alan ile kullanımını sağlayan soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profillerden oluşan konstrüksiyonlardır. Günümüzde üretim, depolama ve lojistik süreçlerinde faaliyet gösteren tüm firmalar, birim zamanda ve alanda daha fazla üretim ve depolama yapabilmeyi hedeflemektedirler. Bu doğrultuda depolanan hammadde ve ürünlerinin daha kullanışlı ve güvenli bir şekilde

saklanabilmesi için endüstriyel depo raf sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin kullanımı ile birlikte birçok ihtiyaca cevap veren farklı boyutlarda ve taşıma kapasitesine sahip raf sistemleri geliştirilmiş olup günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Endüstriyel depo raf sistemlerini oluşturan temel elemanlar Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.3: Endüstriyel depo raf sistemlerini oluşturan yapı elemanları.

Şekilde gösterilen (a) dikey çerçeveyi, (b) kirişi, (c) palet destek çubuğunu, (d) kiriş rakor kilidini, (e) kiriş ucu rakorunu, (f) taban levhasını, (g) ayak koruyucusunu, (h) sprinkler desteğini, (i) dikey şasiyi, (j) sıra aralayıcısını, (k) ayar sacını, (l) ankrajı ve (m) çerçeve bariyerini temsil etmektedir.

Kullanım amacına, ihtiyaca ve depolama alanına göre yaygın olarak kullanılan depo raf sistemleri şunlardır:

- Ayarlanabilir palet raf sistemleri,

- Hareket edebilir palet raf sistemleri,
- Katlı raf sistemleri,
- Sırt sırta depo raf sistemleri
- İçine girilebilir raf sistemleri.



Şekil 2.4: Paletli depo raf sistemlerine bir rnek.

Endüstriyel depo raf sistemlerinin tıpkı tüm yapılar gibi kullanım amacına, ihtiyaca ve depolama alanına göre tasarımı gerçekleştirilse de mevcut yönetmeliklere uygun olma zorunlulukları bulunmaktadır. Türkiye’de,

- TS EN 15878- Çelik Statik Depolama Sistemleri- Terimler ve Tarifler,
- TS EN 15512- Çelik Statik Depolama Sistemleri- Ayarlanabilir Palet Raf Sistemleri- Yapısal Tasarım Kuralları,
- TS EN 16691- Çelik Statik Depolama Sistemleri- Ayarlanabilir Palet Raf Sistemleri – Deprem İçin Tasarım Kuralları

isimli standartlar bulunmakta olup bu sistemlerin tasarımı ve periyodik kontrolleri bu standartlar ışığında gerçekleştirilmektedir. Dünyada yaygın olarak kullanılan kaynaklar ise:

- FEMA 460 Seismic Considerations For Steel Storage Racks Located In Areas Accessible To The Public,
- ANSI MH16.1: 2012 Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks,
- CSN EN 16681 Steel Static Storage Systems - Adjustable Pallet Racking Systems - Principles for Seismic Design,
- AISI S-100, Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members,
- RMI, Rack Manufacturer Institute 2008, Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks,
- FEM 10.2.08, The Seismic Design of Static Steel Pallet Racks

olup bu tez çalışmasında ise endüstriyel depo raf sistemi için URGO Logistics Equipment Co. Ltd. şirketinin tasarımı ön kabul olarak seçilmiştir. Endüstriyel depo raf sistemi sektörünün önde gelen firmalarından olan URGO Logistics Equipment Co. Ltd.'nin nitelikli, yaygın ve küresel üretim girişimleri ile kullanım yelpazesi, tasarım kabulünün nedenselliğini oluşturmaktadır.

3. YÖNTEM

Araştırma nesnesi olan endüstriyel depo raf sistemlerinin doğası ve sismik kuvvetler etkisi olarak ifade edilen dış koşullar karşısında sergilediği karakterler üzerinden bu yapılara dair yeni bir bilgi üretme amacı, özgün ve çoklu metodoloji ve tekniklerin önderliğine zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda tez çalışmasının içselleştirdiği yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Tez çalışmasının yöntem omurgası, öncelikle bu yöntemin ışığında yapılan hesaplamaların ve de kullanılan programların açıklanmasını içermektedir. Buradan hareketle ele alınacak olan URGO endüstriyel depo raf sisteminin tasarımı ifade edilmiş; malzeme modeli, deprem kuvvetleri, yükler ve sınır koşulları olarak başlıklandırılan verileri belirtilmiştir. Bu ekseninde, sonlu elemanlar yönteminin özünü oluşturan "mesh" kavramı açıklanmıştır.

Ön süreç olarak nitelendirilen bu bölümün son aşamasında modal analiz ve zaman-tanım alanında analizler yapılarak çalışmanın doğrulanması safhası gerçekleştirilmiştir.

3.1. Hesaplama Yöntemleri ve Kullanılan Programlar

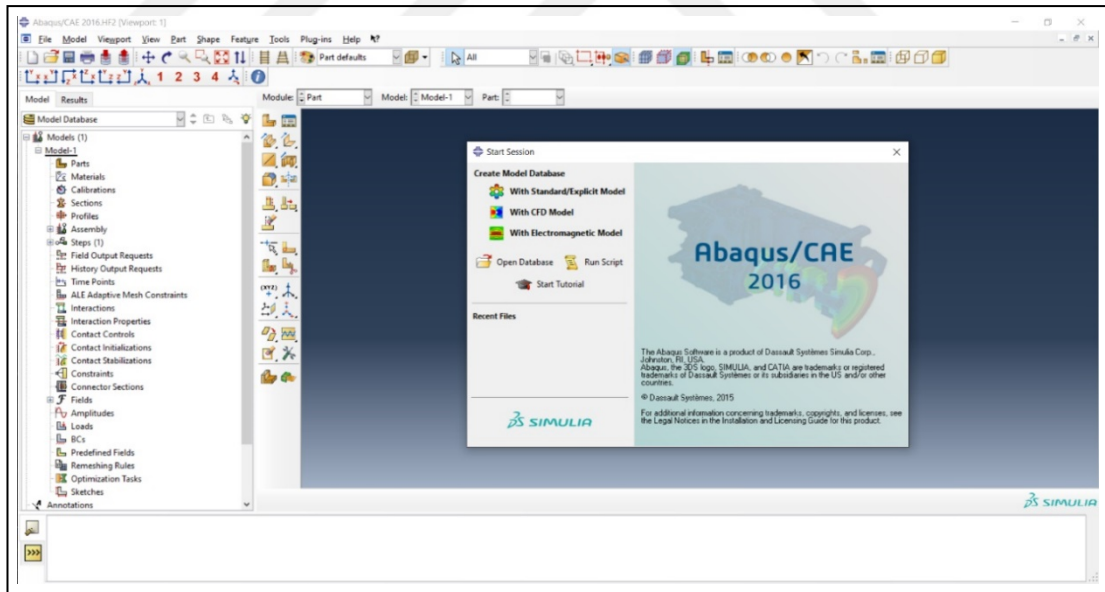
Literatür araştırması sonucunda endüstriyel depo raf sistemlerinin deprem kuvveti etkisi altındaki davranışını incelemek için sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda sonlu elemanlar yöntemi, genellikle mühendislik hesaplamalarında kullanılan parçadan bütüne gitme ilkesine dayalı olarak herhangi bir fiziksel niceliği olan bir maddenin çeşitli analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yönetime göre çözümlenmesi gereken bir yapı ya da yapı elemanı, sonlu elemanlar yöntemi ile “mesh” adı verilen belirli sayıda küçük parçalara bölünmektedir ve analizde her bir parçanın matematiksel davranışının test edilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için çoğunlukla kısmi diferansiyel denklemler ile türetilen formüller kullanılır.

Günümüzde karşımıza çıkan pek çok mühendislik probleminin çözümlerini basit matematiksel ifadelerle sunmak mümkün değildir. Malzemenin üniform olmayan geometrisi, üniform olmayan yükü ve lineer olmayan davranışı, analitik çözümler elde etmemizi engeller. Bu gibi durumlarda problem daha küçük parçalara bölünerek

yaklaşık çözümler elde edilir. Bu da böyle bir çalışma ekseninde, bilgisayar yazılımlarının potansiyellerinin ve sunacağı imkanların önemini vurgulamaktadır.

Abaqus FEA (eski adıyla ABAQUS), sonlu elemanlar analizi ve bilgisayar destekli mühendislik için geliştirilmiş, ilk kez 1978'de piyasaya sürülen, gerçekçi modellerin oluşturulmasını sağlayarak ayrıntılı analizlere olanak sağlayan bir sonlu elemanlar programıdır (Şekil 3.1). Farklı malzeme modelleri ve sonlu eleman tipleri sayesinde çözümü zor olan lineer ve lineer olmayan projeleri analiz etme imkânı sunmaktadır. Paket halinde beş temel yazılımdan oluşur. Bunlar:

- Abaqus/Standard, genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı,
- Abaqus/Explicit, dinamik bir sonlu eleman programı,
- Abaqus/CFD genel amaçlı akışkanlar dinamiği için kullanılan program,
- Abaqus/CAE, sonlu eleman modelleri oluşturmak, analizi göndermek, işleri izlemek ve teşhis etmek ve sonuçları değerlendirmek için etkileşimli program,
- Abaqus/Viewer, Abaqus/CAE'nin görselleştirmeye dayalı bir yazılımı.



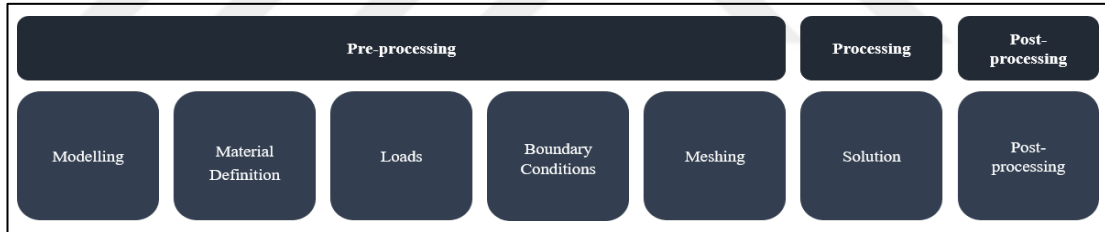
Şekil 3.1: Abaqus programının arayüzü.

Bu araştırmada tezin kapsamı ve çalışmanın hassasiyeti nedeniyle, sunduğu imkanlar ve güçlü potansiyelleri doğrultusunda Abaqus/CAE yazılımı tercih edilmiştir.

Her tipik sonlu eleman programında olduğu gibi, Abaqus'te de bir analiz genellikle ön analiz, analiz ve analiz sonrası olarak adlandırılan üç aşamadan oluşur. Modelleme, herhangi bir analizin ilk adımıdır, genellikle ön işleme aşamasının ilk adımıdır. Yapının geometrisinin yazılıma tanıtılmasıdır. İkinci aşama, tasarlanan yapıyı oluşturan malzemenin gerekli karakteristik özelliklerinin analiz türüne göre yazılıma tanıtıldığı malzeme tanımlamasıdır. Üçüncü aşama olan yükler, yapıya uygulanacak dış yüklerin veya bileşenin ağırlığının tanımlanmasıdır. Dördüncü adım olan sınır koşulları, yapının destek koşullarının yazılıma tanıtılmasıdır. Ön işleme adımının son adımı olan “mesh”, sonlu elemanlar adı verilen daha küçük ve daha basit şekillere bölmek anlamına gelmektedir.

Analiz aşaması, simülasyon özelliklerini tanımladıktan sonra bazı diferansiyel denklemleri kullanmak, yapıyı matrisler cinsinden temsil etmek sorunu çözme işlemini barındırır.

Analiz sonrası aşaması analizin son aşamasıdır ve sonuçların elde edilmesi, bu sonuçların raporlanması, resim, animasyon veya video oluşturulması gibi adımları içerir.



Şekil 3.2: Sonlu Elemanlar Yöntemi analizlerine genel bir bakış.

Tüm bu detaylar Şekil 3.2'deki şema ile özetlenebilmekte olup bu çalışmada bu aşamalar sırası ile takip edilmiştir.

3.2. Tasarım ve Kullanılan Veriler

3.2.1. Endüstriyel Depo Raf Sisteminin Modellenmesi

Çelik yapı elemanları iki ana grupta toparlanabilir. Bunların ilk grubu, sıcak hadde elemanları ve levhalardan oluşan elemanlardır. İkinci grup ise, daha az bilinen

fakat zamanla önemi artan, sürekli şekil verme, pres bükme veya eğilmeli bükme yöntemiyle soğuk şekillendirilmiş çelik sac, şerit, levha veya yassı çubuklardır.

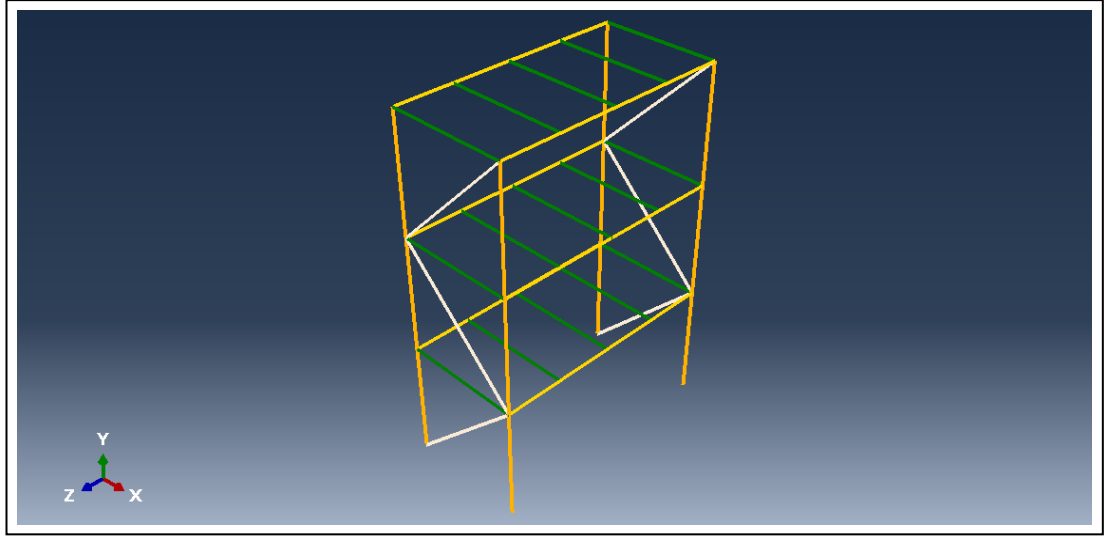
Günümüzde soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin kullanımı birçok avantajından ötürü hızla artarken bu profillere çoğunlukla az kat sayılı binalarda, küçük ticari binalarda, endüstriyel birimlerde ve tek katlı spor salonlarının seri yapımlarında rastlanılmaktadır. Genel olarak soğuk şekillendirilen çelik profillerin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Hafiflik,
- Yüksek dayanım ve rijitlik,
- Seri üretim kolaylığı,
- Hızlı, kolay montaj ve kurulum,
- Hava koşulları sebebi ile gecikmelerin önlenmesi,
- Daha doğru detaylandırma.

Yapı çerçevesinde yaygın olarak kullanılan soğuk şekillendirilmiş profillerde C kesit, Z kesit, şapka kesit, I kesit, T kesit ve tüp elemanlardır sıklıkla görülmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalar sonucu sigma kesitinin standart kesitlerle kıyaslandığında yüksek yük taşıma kapasitesi, daha küçük boşluk boyutu, daha az ağırlık ve daha büyük burulma rijitliği gibi birçok avantaja sahip olduğunu göstermektedir [1].

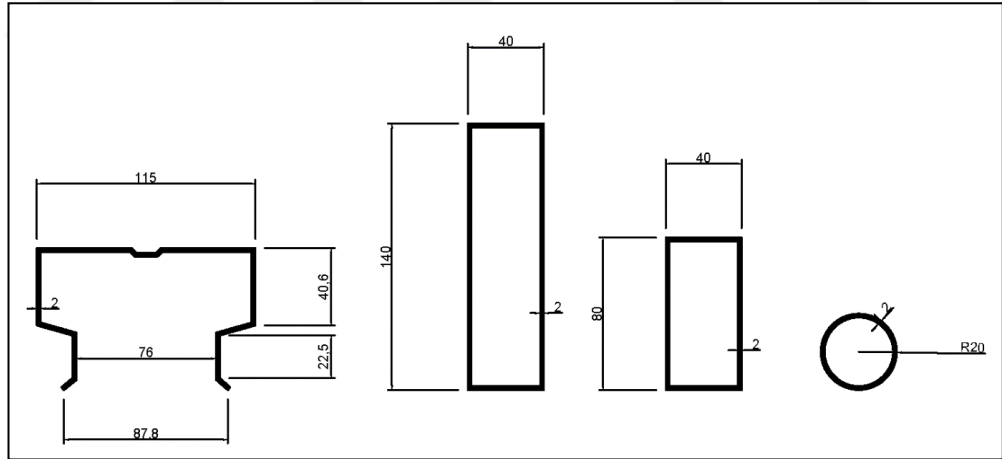
Endüstriyel depo raf sistemleri ise bu soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı profillerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Şekil 3.3'te görülen ve tasarımı belirtildiği üzere endüstriyel depo raf sistemi sektöründe önde gelen firmalardan birisi olan URGO Logistics Equipment Co. Ltd.'ye ait bu sistemin hem yatay ekseninde, diğer bir adıyla down-aisle yönünde, hem de düşey ekseninde, diğer bir adıyla cross-aisle yönünde tek bir açıklık bulunmakta olup sistem, 3 katlıdır. Down-aisle yönündeki açıklık 4 metre iken cross-aisle yönündeki açıklık 2 metredir. Ana kirişlerin ve tali kirişlerin bir araya gelmesi ile oluşan palet rafları 2 metrede bir olacak şekilde yerleştirilmiştir. Toplamda ise yapıda 6 ana kiriş, 15 tali kiriş, 12 kolon ve 6 çapraz eleman bulunmakta olup düğüm noktalarının moment aktaran birleşim olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3.3: Yapının üç boyutlu görüntüsü.

Bu sistemde kolonlar için sigma kesit, kirişler için iki ayrı derinliğe sahip (140 mm ve 80 mm) kutu kesit, çapraz elemanlar için ise tüp kesitler kullanılmıştır. Kullanılan tüm profillerin et kalınlıkları 2 milimetredir. Kesitlerin görüntüleri ise Şekil 3.4'te gösterilmiş olup bahsedilen ölçüler milimetre cinsindendir.



Şekil 3.4: Yapıda kullanılan profillerin kesitleri.

3.2.2. Malzeme Modelinin Oluşturulması

Sistemde yapısal çelik olarak S235 çeliği kullanılmış olup bu malzemenin karakteristik özellikleri; inşaat mühendisliği disiplindeki analitik çalışmalar bağlamında elzem bir program olması, yaygınlığı ve etkinliği, diğer programlarla uyumlu çalışabilmesi ve malzeme modeli yelpazesinin oldukça geniş olması sebebi ile

Structural Analysis Program, SAP2000'den alınmıştır. Analizler için dünyanın hemen her ülkesinde kabul gören, resmi ölçü sistemi konumunda olan SI birim sistemi kullanılmıştır. Bu bağlamda 4 farklı kategoride değer kullanılmıştır. Yoğunluk veya birim hacimdeki madde miktarı değeri olarak 7.849E-09 ton/m³ alınmıştır. Elastik kategorisinde elastisite modülü değeri için 210000 MPa (N/mm²), poisson oranı ise 0.3 olarak alınmıştır.

Plastisite kategorisinde ilk olarak malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği çıkartılması gerektiğinden Ramberg-Osgood katsayısı hesaplanmıştır. Bu hesaplamada,

E = Elastisite modülünü,

F_{tu} = Maksimum çekme kuvvetini,

F_{ty} = Akma dayanımını,

ϵ_{max} = Kopma Noktasındaki şekil değiştirmeyi,

ϵ_{us} = Düzgün şekil değiştirmeyi

temsil etmektedir.

$$\epsilon_{us} = 100 * (\epsilon_r - \frac{F_{tu}}{E}) \quad (3.1)$$

$$n = \frac{\ln(\epsilon_{us}/0.2)}{\ln(F_{tu}/F_{ty})} \quad (3.2)$$

Denklemler vasıtasıyla Ramberg-Osgood katsayısı hesaplanmıştır. Bu değer hesaplanmasından sonra,

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 * (\frac{\sigma}{F_{ty}})^n \quad (3.3)$$

denklemleri ile şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Daha sonrasında bu değerler,

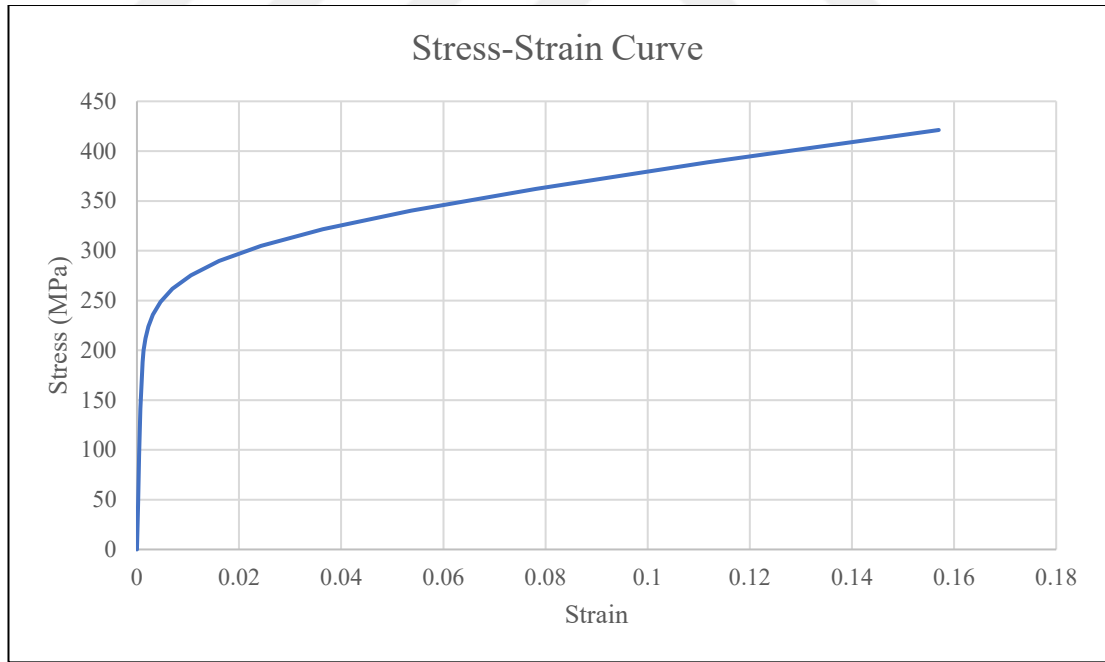
$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.4)$$

$$\sigma_{true} = \sigma * (1 + \epsilon) \quad (3.5)$$

formülleri ile düzenlenerek analizlerde kullanılacak olan akma dayanımı ve plastik şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır [9].

Tablo 3.1: Plastik malzeme özellikleri.

Akma Dayanımı (MPa)	Plastik Şekil Değişirme
235.7329762	0
248.6399167	0.001480957
261.8088094	0.003818678
275.3922841	0.007443761
289.6184582	0.012961022
304.8220908	0.021199879
321.4862964	0.033268428
340.2976951	0.050603479
362.2184806	0.075002842
388.5795942	0.108619166
421.2	0.153889555



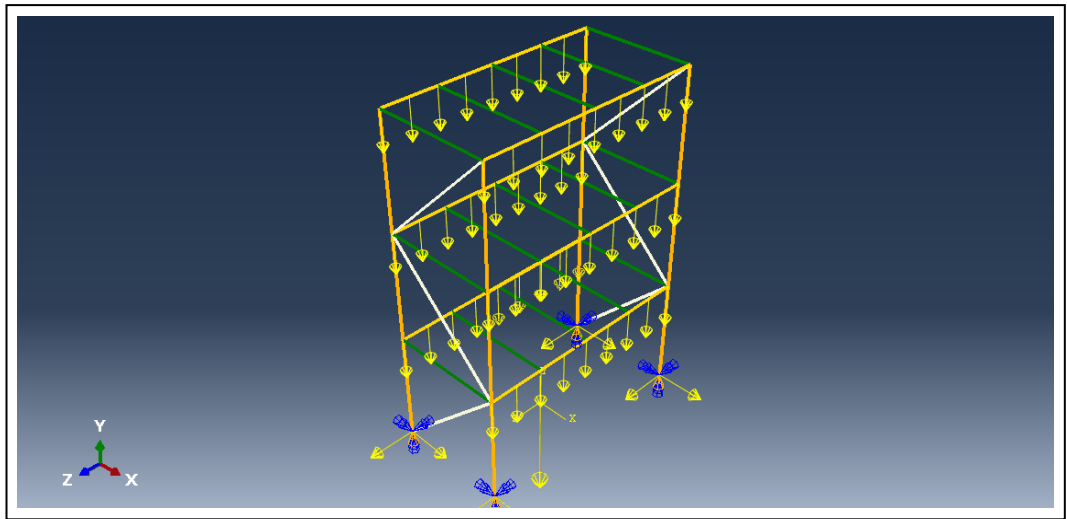
Şekil 3.5: Malzemenin gerilme-şekil değişirme grafiği.

Hesaplanan tüm bu değerler Tablo 3.1’de gösterilmiş olup malzemenin gerilme-şekil değişirme grafiği ise Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

3.2.3. Yükler ve Sınır Koşulları

Bir sistemin genel olarak yatay ve düşey doğrultuda ötelenme ve dönme hareketlerini yapmasını engellemek üzere sabit, hareketli veya ankastre biçimde bulunan elemanlara mesnet adı verilir. Yapıların zemin ile etkileşimi olan bölgeleri ankastre mesnet olarak tasarlanır. Bu bağlamda gerçek davranışı simüle edecek şekilde modellenen bu sistemde ankastre mesnetler kullanılmış olup ilgili eksenlerde ötelenme ve dönme hareketleri sınırlandırılmıştır. Çalışmada iki ayrı yk tanımlaması yapılmıştır. Kesit boyutlarına ve malzeme yoğunluklarına göre hesaplanan tüm bileşenlerinin toplam öz ağırlığından oluşmakta olan yerçekimi yükü ile endüstriyel depo raf sisteminin taşıması n görülen palet l yükü tanımlanmıştır. Genel olarak bu sistemlerde 3 metrelik bir kirişin 850 kilogram kadar palet yükünü taşıyacağı varsayıldığından sistemde bulunan ana kirişlere, kiriş uzunlukları göz önünde bulundurularak, düzgün yayılı yük şeklinde 1.41 N/mm hesaplanarak yk tanımlaması yapılmıştır.

Tabloda isimleri, etki süreleri ve yönleri belirtilen deprem kayıtları zaman ve ivme değerlerinden oluştuğu için Abaqus programında genlik olarak tanımlanmakta ve mesnetlere etki etmektedir. Zaman tanım alanında yapılan hesaplamaların lineer olmayan analiz adımımda, serbestlik derecelerinin etkilendiği doğrultulardaki mesnet sınırlandırılmaları kaldırılarak yapıdaki tepe yer değiştirme değerleri, taban kesme kuvvetleri ve enerji dağılım grafiklerinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 3.6: Sınır koşulları ve yapıya etkiyen yükler.

Bu doğrultuda tüm deprem kayıtlarının spektral ivme değerleri 1 ile 6 arasında ölçeklendirilerek yapıyı etkilemiştir. Analiz sayısının fazla olması nedeniyle Abaqus programının bir eklentisi olan Macro Manager yardımıyla tüm analizler Python yazılım dili kullanılarak Python kodu ile başlatılmış ve tamamlanmıştır.

Tablo 3.2: Deprem kayıtlarına genel bir bakış.

Deprem Kaydı	Etkin Süre (s)	Yön
V3-RSN164_IMPVAL.L_H-H-CPE147	40.66	U1
V3-RSN164_IMPVAL.L_H-H-CPE237	40.66	U3
V3-RSN832_LANDERS_ABY000	38.12	U1
V3-RSN832_LANDERS_ABY090	38.12	U3
V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR--L	37.56	U1
V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR--T	37.56	U3
V3-RSN1762_HECTOR_ABY090	35.08	U1
V3-RSN1762_HECTOR_ABY360	35.08	U3
V3-RSN1816_HECTOR_NPF180	35.86	U1
V3-RSN1816_HECTOR_NPF270	35.86	U3
V3-RSN2107_DENALI_CARLO-90	35.86	U1
V3-RSN2107_DENALI_CARLO360	35.86	U3
V3-RSN3757_LANDERS_NPF090	41.92	U1
V3-RSN3757_LANDERS_NPF180	41.92	U3
V3-RSN3760_LANDERS_BLC270	31.94	U1
V3-RSN3760_LANDERS_BLC360	31.94	U3
V3-RSN6901_DARFIELD_FD.CSN09W	45.44	U1
V3-RSN6901_DARFIELD_FD.CSS81W	45.44	U3
V3-RSN6949_DARFIELD_PEECN11W	38.7	U1
V3-RSN6949_DARFIELD_PEECS79W	38.7	U3
V3-RSN8597_SIERRA.MEX_CISWSHNE	50.06	U1
V3-RSN8597_SIERRA.MEX_CISWSHNN	50.06	U3

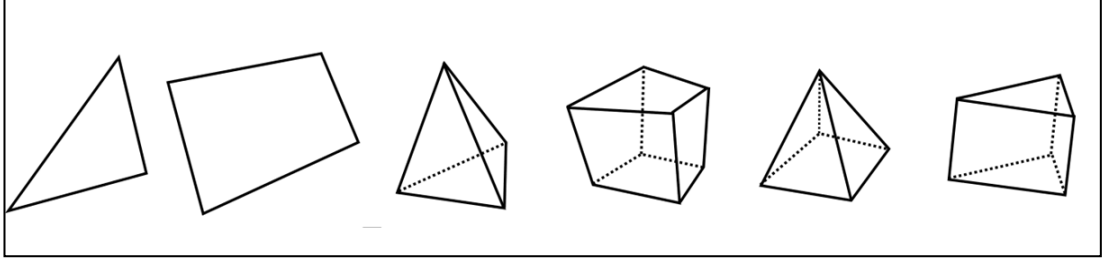
3.2.4. Mesh (Ağ Örgüsü)

Çoğu mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü benimsenir. Sonlu elemanlar yöntemi ile parça modellenirken, model küçük parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılır, bu küçük parçalara “mesh” denir.

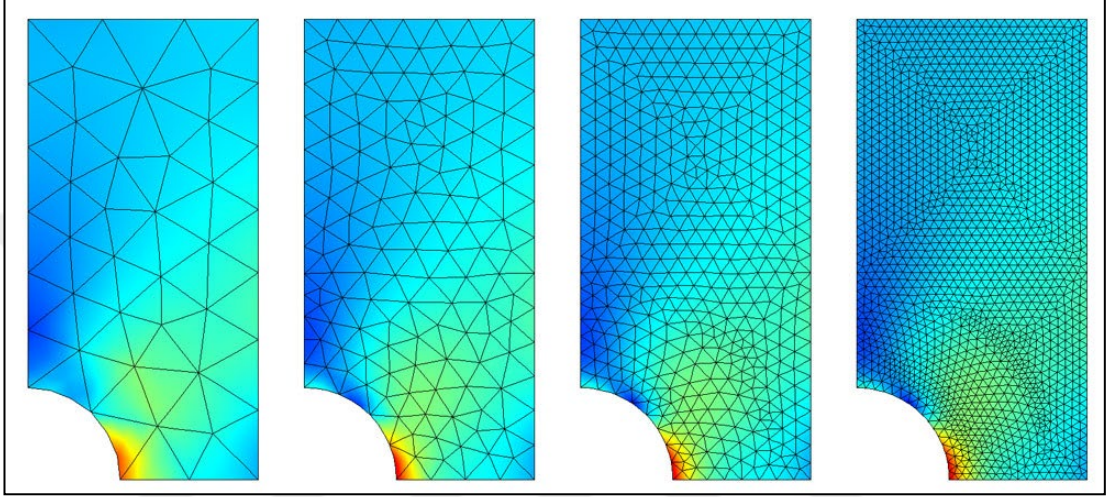
Ağ oluşturma işleminin temel mantığı, az sayıdaki anahtar noktalar için girilmiş olan elemanların süreklilik ve düğüm koordinat bilgilerinden yola çıkarak işlem yapılan bölgeyi istenen incelikte elemanlara ayırma olarak tanımlanabilir.

Yukarıda bahsedilen bu küçük parçalar ana başlıklar halinde iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere, Şekil 3.7’de geometrileri görüleceği üzere, ikiye ayrılır. İki boyutlu mesh, triangle, üç kenardan oluşan, en basit ağ türlerinden birisidir. Quadrilateral ise dört kenardan oluşmaktadır.

Üç boyutlu mesh ise, iki boyutlu mesh’e göre daha kapsamlı olduğundan “tetrahedron”, “pyramid”, “triangular prism”, “hexahedron” ve “polyhedron” olarak beşe ayrılır. Bir tetrahedron mesh elemanının 4 köşesi, 6 kenarı vardır ve 4 üçgen yüzle sınırlanmıştır. Çoğu durumda, bir dört yüzlü hacim ağı otomatik olarak oluşturulabilir. Dörtgen tabanlı bir piramidin 5 köşesi, 8 kenarı, 4 üçgen ve 1 dörtgen yüzü vardır. Bunlar, hibrit ağlarda ve ızgaralarda kare ve üçgen yüzlü elemanlar ve diğerleri arasında geçiş elemanları olarak etkin bir şekilde kullanılır. Üçgen prizmanın 2 üçgen ve 3 dörtgen yüzle sınırlanan 6 köşesi, 9 kenarı vardır. Bu tür katmanın avantajı, sınır katmanını verimli bir şekilde çözmesidir. Hexahedron bir küp olmakla birlikte altı yüzlü, 6 dörtgen yüzle sınırlanmış 8 köşeye, 12 kenara sahiptir. Aynı zamanda altıgen veya tuğla olarak da adlandırılır. Aynı hücre miktarı için, altı yüzlü ağlarda çözümlerin doğruluğu en yüksektir. Polyhedron mesh elemanın ise herhangi bir sayıda köşesi, kenarı ve yüzü bulunmaktadır. Komşu yüzey sayısının fazla olması sebebi ile analizlerin çözümlenmesinde daha fazla işlem gerektirir.



Şekil 3.7: Sırasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu mesh geometrileri.



Şekil 3.8: Mesh elemanlar ile sarılmış bir şekil.

Topçu and Taşgetiren (1997) doğru ağ yapısının kurulmasının önemini vurgularken bu detayın doğru kurulması ile analiz sonuçlarının daha doğru değerlere ulaştığını belirtmişlerdir [10].

Yapılan bu çalışmada mesh elemanların sayısının artması ile birlikte analiz sürelerinin uzayacağı ve bilgisayarların daha fazla güç harcayacağı düşünülerek optimum aralıkta, çubuk eleman olarak modellenmesi gerçekleştirilen için endüstriyel depo raf sistemi için B31 mesh elemanı tüm yapı elemanları için tercih edilmiştir.

3.3. Çalışmanın Doğrulanması

3.3.1. Modal Analiz

Frekans veya titreşim sayısı bir olayın birim zaman (genel olarak 1 saniye) içinde hangi sıklıkla, kaç defa tekrarlandığının ölçümüdür. Matematiksel ifadeyle çarpmaya göre tersi ise periyot olarak adlandırılır. Modal analiz ise frekans alanındaki

sistemlerin dinamik özelliklerinin incelenmesidir. Bir yapının doğal frekansı bir depremin frekansı ile eşleşirse, yapı artan genliğe ve bunun neden olduğu gerilime dayanamayarak yıkılır. Rezonans, mühendislikte teorik olarak “genliğin sonsuza gitmesi” şeklinde açıklanır. Bu sebeple bir yapının doğal frekansının, yapının inşa edileceği bölgede beklenen depremlerin frekansı ile eşleşmemesi zorunlu olduğundan, bu titreşim periyotlarının deprem mühendisliğinde dikkate alınması önem arz eder.

Söz gelimi, önemli bir vaka olarak addedilen ABD'nin Washington eyaletinde inşa edilen Tacoma Narrows Köprüsü, 7 Kasım 1940 günü saat 11:00 sıralarında Şekil 3.9'da görüldüğü üzere yıkılmıştır. Köprü'nün yıkılmasının ardından yapılan araştırmalarda, yıkımın sebebinin aeroelastik çarpıntı olduğu belirlenmiştir. Daha basit bir ifade ile, rüzgâr kaynaklı bir etkinin frekansı, köprü'nün doğal frekansına eşit olduğundan, bir rezonans durumu meydana oluşmuş ve köprü, artan gerilime dayanamayıp yıkılmıştır. Bu bağlamda yapıların frekanslarının modal analiz yöntemi ile hesaplanması oldukça önemlidir [11].



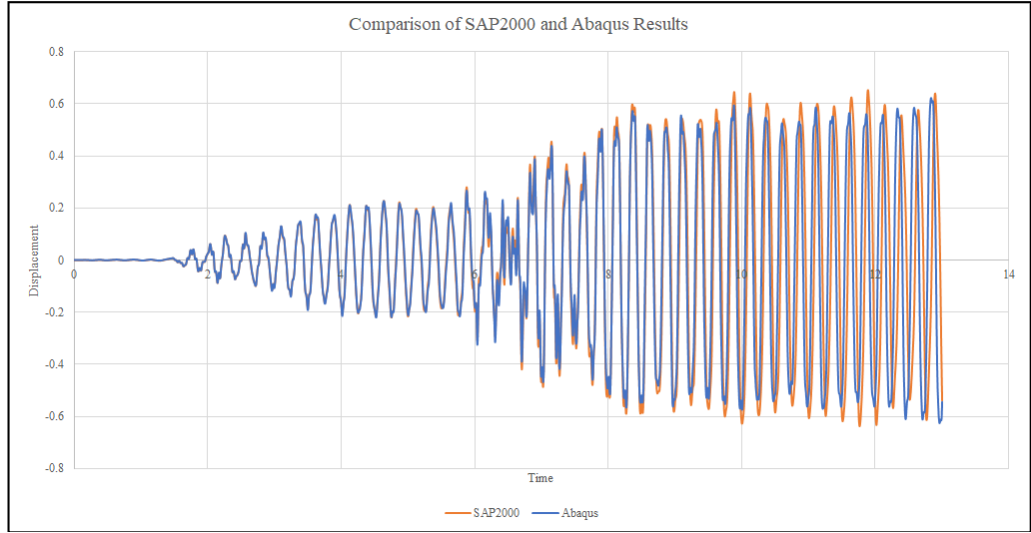
Şekil 3.9: Tacoma Narrows Köprüsü'nün yıkılması.

Bu tartışmalardan hareketle, tez çalışmasında Abaqus programında yapılan çalışmaların doğrulanması için bağımsız olarak inşaat mühendisliği biliminde yaygın ve efektif olarak kullanılan programlardan biri olan Structural Analysis Program, SAP2000 kullanılmıştır. Abaqus ile yukarıda tasarımı gösterilen endüstriyel depo raf sisteminin modal analizi gerçekleştirilerek yapının frekans değerleri elde edilmiştir. SAP2000 programında aynı yapı modellenerek modal analiz yapılmış, elde edilen frekans değerleri karşılaştırılmıştır.

Yapının 1. modunun frekans değeri SAP2000 programında 4,809494 cyc/sn olarak hesaplanırken, Abaqus programında %7 farkla 5,1464 cyc/sn olarak hesaplanmıştır. İki değer arasındaki fark oldukça küçük olduğu için analiz sonuçlarının aynı olduğu ve kullanılan yöntemin doğru olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak yapının lineer ve lineer olmayan davranışlarını gözlemlemek için örnek deprem kaydı alınmış ve yapı hem SAP2000 hem de Abaqus programında etkilenmiş ve tepe yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır.

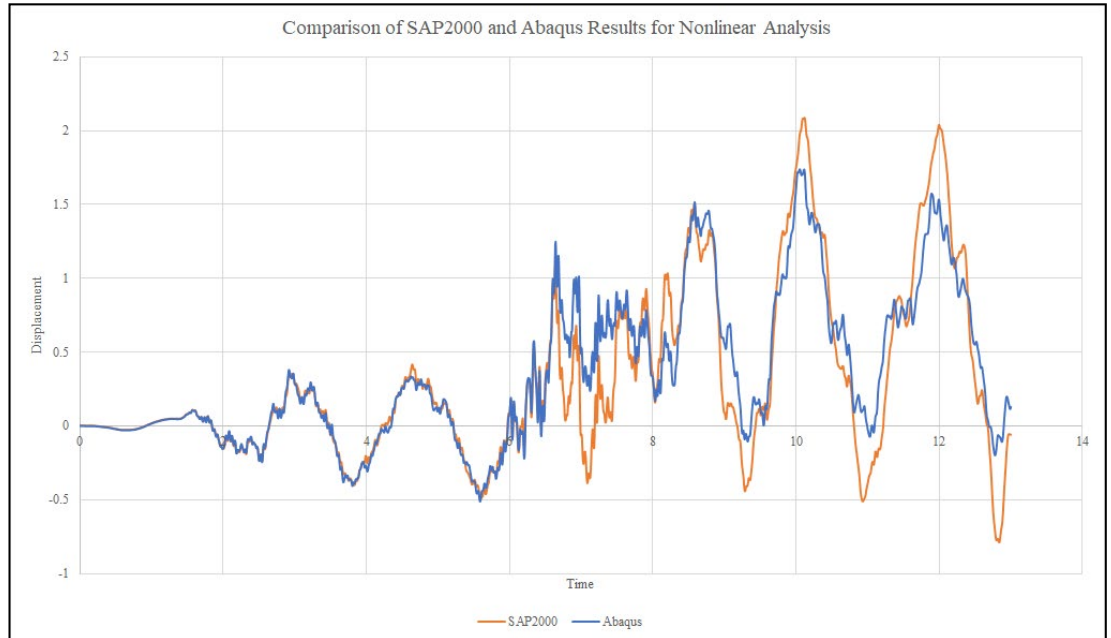
3.3.2. Zaman-Tanım Alanında Analiz

SAP2000'de doğrusal davranış için sönümsüz yapının en yüksek tepe yer değiştirme değeri 0,650671 birim ve en düşük tepe yer değiştirme değeri -0,63545 birim olarak hesaplanmıştır. Abaqus programında aynı yapı geometrisi, malzeme modeli, sınır koşulları ve yapıya deprem kayıt etkisi sonucunda en yüksek tepe yer değiştirme değeri 0,621917 birim ve en düşük tepe yer değiştirme değeri -0,62674 olarak hesaplanmıştır. İki farklı programda yapılan analizler sonucunda zaman-yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: SAP2000 ve Abaqus programlarında gerçekleştirilen lineer davranış için analizlerin karşılaştırılması.

Sönümsüz yapıya doğrusal olmayan davranış için aynı işlemler tekrarlanarak yapılan deprem kaydı sonucunda SAP2000'deki zamana bağlı tepe yer değiştirme değerleri ile Abaqus programında elde edilen zamana bağlı tepe yer değiştirme değerleri Şekil 3.11'de karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntemin doğrulanması sonucunda tez çalışmasında bu metodolojinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.11: SAP2000 ve Abaqus programlarında gerçekleştirilen doğrusal olmayan davranış için analizlerin karşılaştırılması.

4. ANALİZLER VE SAYISAL HESAPLAMALAR

Sonlu elemanlar yöntemi ve bilgisayar programları ile yazılımlar eşliğinde uygulanan analizler doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analiz ve artırımı dinamik analizdir. Doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analiz, teorik olarak sönüm oranının açıklanmasını gerektirmektedir. Bu oran sonrasında yapılan uygulamanın sonuçlarıyla doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analiz gerçekleştirilmiş olmaktadır. Artırımı dinamik analiz ise U1 ve U3 yönlerinde ayrı olarak analizlerin yapılmasını gerektirmektedir. Endüstriyel depo raf sistemlerinin katlı yapısı düşünüldüğünde her iki yön için de görel kat öteleme oranlarının hesaplanması, artırımı dinamik analiz sonuçlarının elde edilmesi elzemdir. Analizler, sayısal boyutlarının yanı sıra grafikler olarak ifade edilerek görsel boyutta da açıklanmıştır. Benzer şekilde endüstriyel depo raf sistemlerinin zeminle olan ilişkisi düşünüldüğünde, yine U1 ve U3 olmak üzere her iki yön için de taban kesme kuvvetlerinin hesaplanması elzem olmaktadır. Kat öteleme oranlarında da olduğu gibi, taban kesme kuvvetleri için artırımı dinamik analizler, sayısal boyutlarının yanı sıra grafikler olarak ifade edilerek görsel boyutta da açıklanmıştır.

Enerji yayılımı, artırımı dinamik analizin sonuçları ekseninde ortaya çıkan bir olgudur. Bu bağlamda yapının sismik kuvvetlerin etkisi süresince aldığı hasar ve deformasyonu ifade edebilmek ve yorumlayabilmek adına enerji yayılımı grafikleri hazırlanmıştır.

4.1. Doğrusal Olmayan Zaman-Tanım Alanında Analiz

Zaman-tanım alanı analizi, belirtilen zaman fonksiyonuna göre değişebilen yükleme altındaki dinamik yapısal tepkinin doğrusal veya doğrusal olmayan değerlendirmesini sağlar [12]. Hareket denklemiyle gösterilen dinamik denge denklemleri, modal veya doğrudan entegrasyon yöntemleri kullanılarak çözülür.

$$M * a + C * v + K * u = F \quad (4.1)$$

Burada M kütleyi, a ivmeyi, C sönüm oranını, v hızı, K rijitliği, u deplasmanı ve F de kuvveti temsil etmektedir. Buradan hareketle sönüm oranının hesaplanması gerekmektedir.

4.1.1. Sönüm

Sönüm, katı ortamlar ve yapılarda titreşim enerjisinin zaman ve mesafe boyunca dağılmasıdır. Havadaki sesin emilmesine benzer şekilde, hareketi azaltan ve enerjiyi dağıtan herhangi bir sürtünme türü olduğunda sönümleme meydana gelir. Her malzemenin sönümleme kapasitesi, onun kayıp faktörü olarak isimlendirilir, her döngü sırasında dağılan enerji ile sistemde kalan enerji arasındaki oranı temsil eder.

İnşaatta, titreşimleri sınırlamak ve binalar ile altyapılarda güvenlik ve konfor sağlamak için sönümleme esastır. Klasik Rayleigh sönümlemesi ise, kütle ve sertliğin doğrusal bir kombinasyonu ile orantılı olan viskoz sönümlemedir. Rayleigh sönümleme belirli matematiksel kolaylıklar sağlar ve dahili yapısal sönümlemeyi modellemek için yaygın olarak kullanılır.

Bununla birlikte, Rayleigh sönümlemenin daha az çekici özelliklerinden biri, elde edilen sönümleme oranının tepki frekansına göre değişmesidir. Sertlik orantılı terimi, yanıt frekansıyla doğrusal orantılı olan sönümlemeye katkıda bulunur ve kütle orantılı terimi, yanıt frekansıyla ters orantılı olan sönümlemeye katkıda bulunur.

Yapısal titreşimlerde sönüm oranı kritik sönüm oranının çok altında gerçekleşir, genelde 0.01- 0.20 arasında değişmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada sönüm oranı 0,02 olarak kabul edilmiştir.

Endüstriyel depo raf sisteminin sönümlemesi Rayleigh yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir.

Bu yaklaşımda sönüm α ve β katsayılarının kütle ve rijitliğe oranı ile ilgilidir [13]. B katsayısının 0 olarak alınmasının analiz sonuçlarını değiştirmedeği, analiz süresini kısaltmaya yardımcı olduğu görülmüştür [14]. Böylece aşağıdaki denkleme göre β katsayısı 0 olarak alınmış ve α katsayısı hesaplanarak doğrusal olmayan zaman-tanım alanındaki analizler için kullanılmıştır.

$$\alpha = \frac{4 * \pi * \xi}{T_1} \quad (4.2)$$

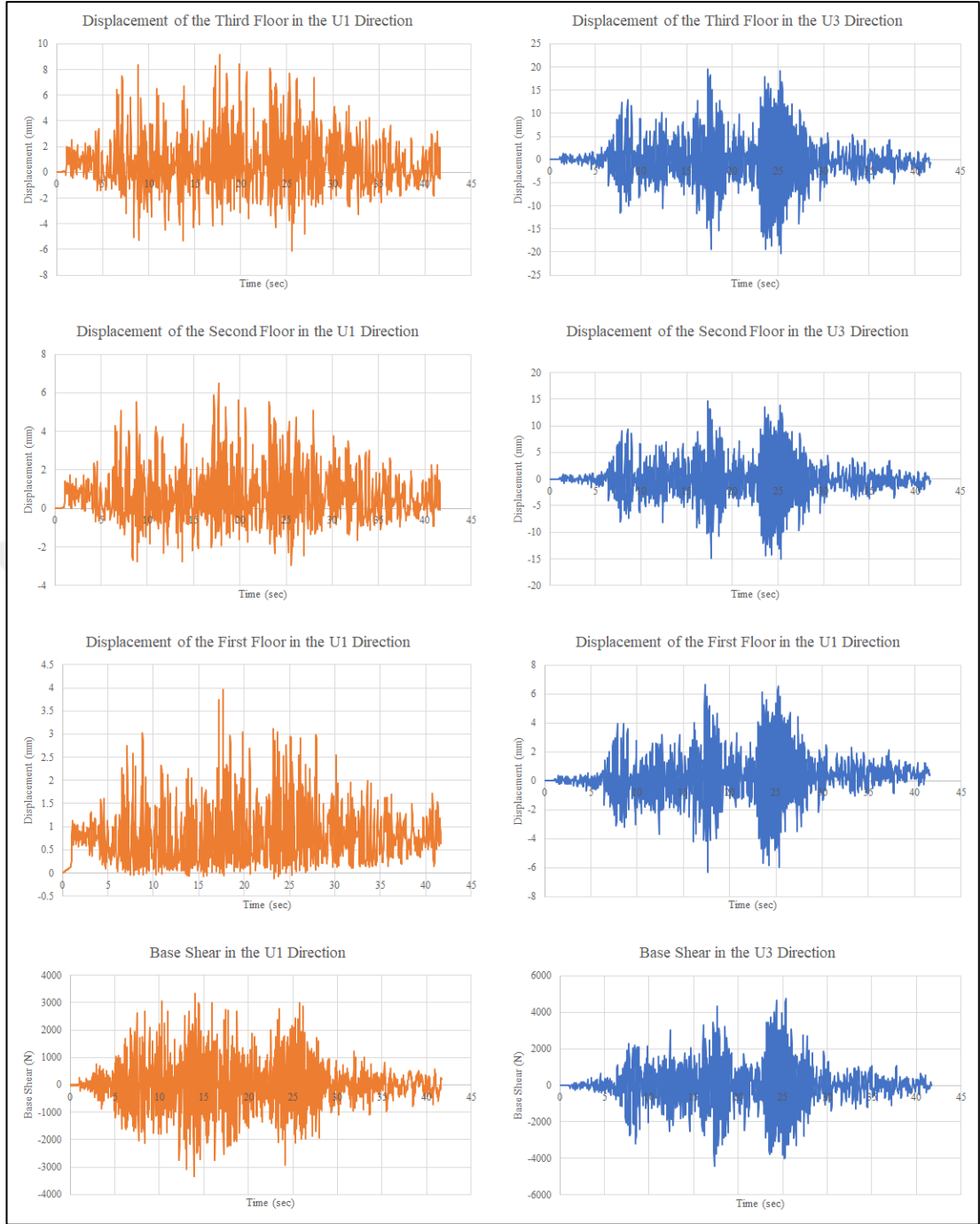
Burada ξ sönüm oranını, T1 etkin periyodu temsil etmektedir. Sonuç olarak α katsayısı 1.293431 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2. Analiz Sonuçları

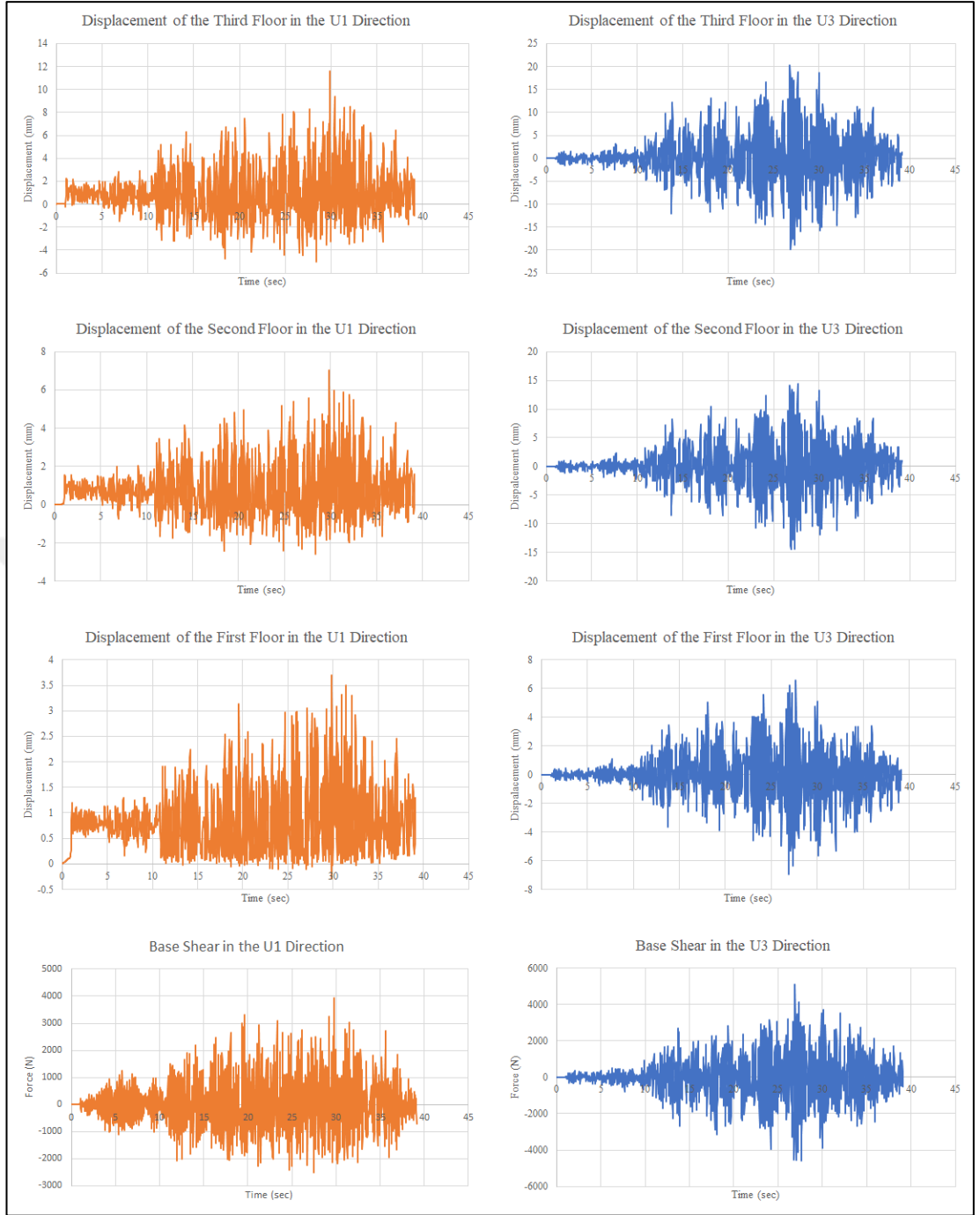
Bu bölümde Tablo 4.1’de isimlendirilen deprem kayıtlarının, yapıya etkisi sonucu elde edilen tepe yer değiştirme değerleri ve taban kesme kuvveti değerlerinin sonuçları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te paylaşılmaktadır.

Tablo 4.1: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkitilen yönleri.

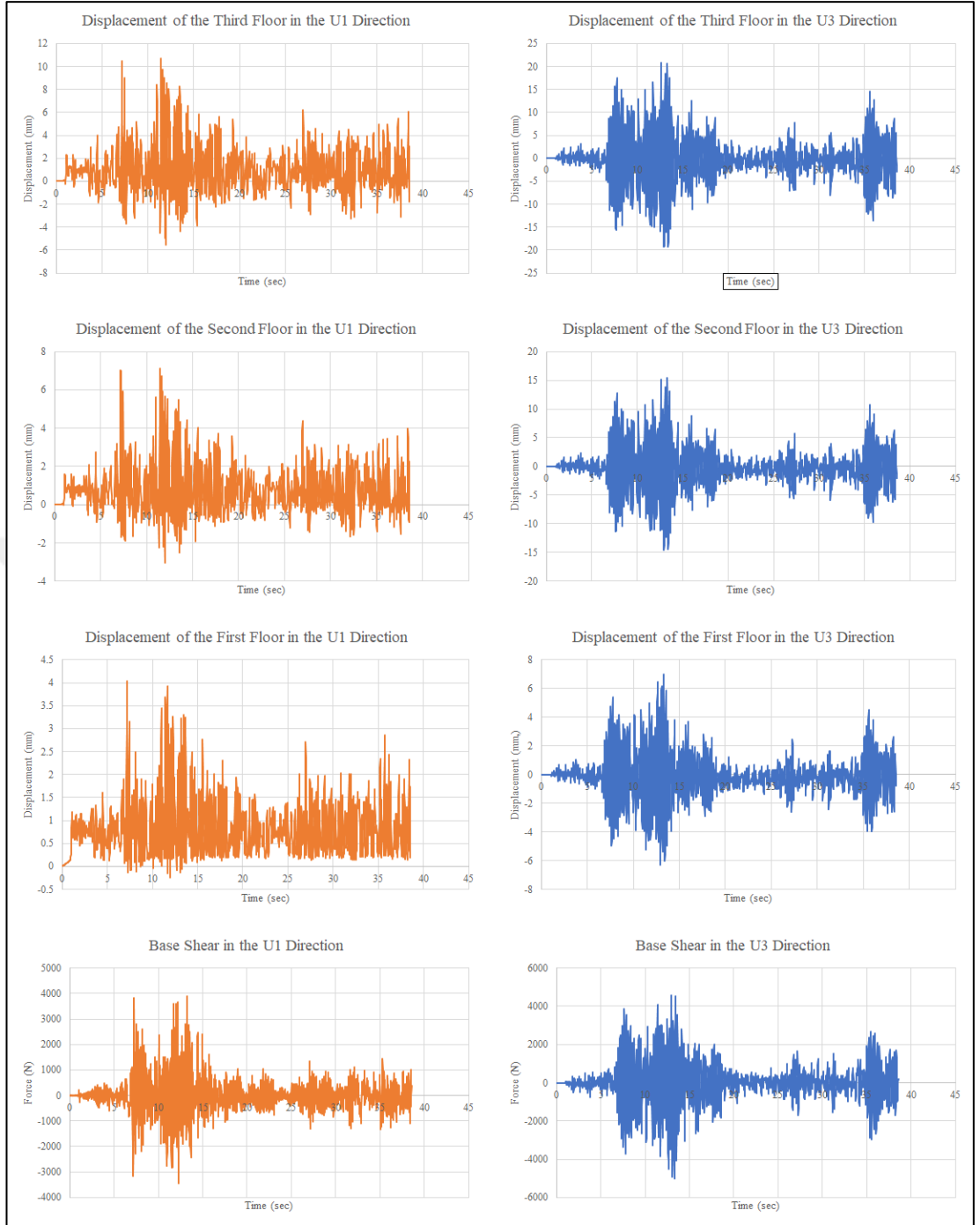
No	Deprem Kaydı	Yön
1	V3-RSN164_IMPVAL.L.H_H-CPE147	U1
2	V3-RSN164_IMPVAL.L.H_H-CPE237	U3
3	V3-RSN832 LANDERS_ABY000	U1
4	V3-RSN832 LANDERS_ABY090	U3
5	V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR—L	U1
6	V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR--T	U3
7	V3-RSN1762_HECTOR_ABY090	U1
8	V3-RSN1762_HECTOR_ABY360	U3
9	V3-RSN1816_HECTOR_NPF180	U1
10	V3-RSN1816_HECTOR_NPF270	U3



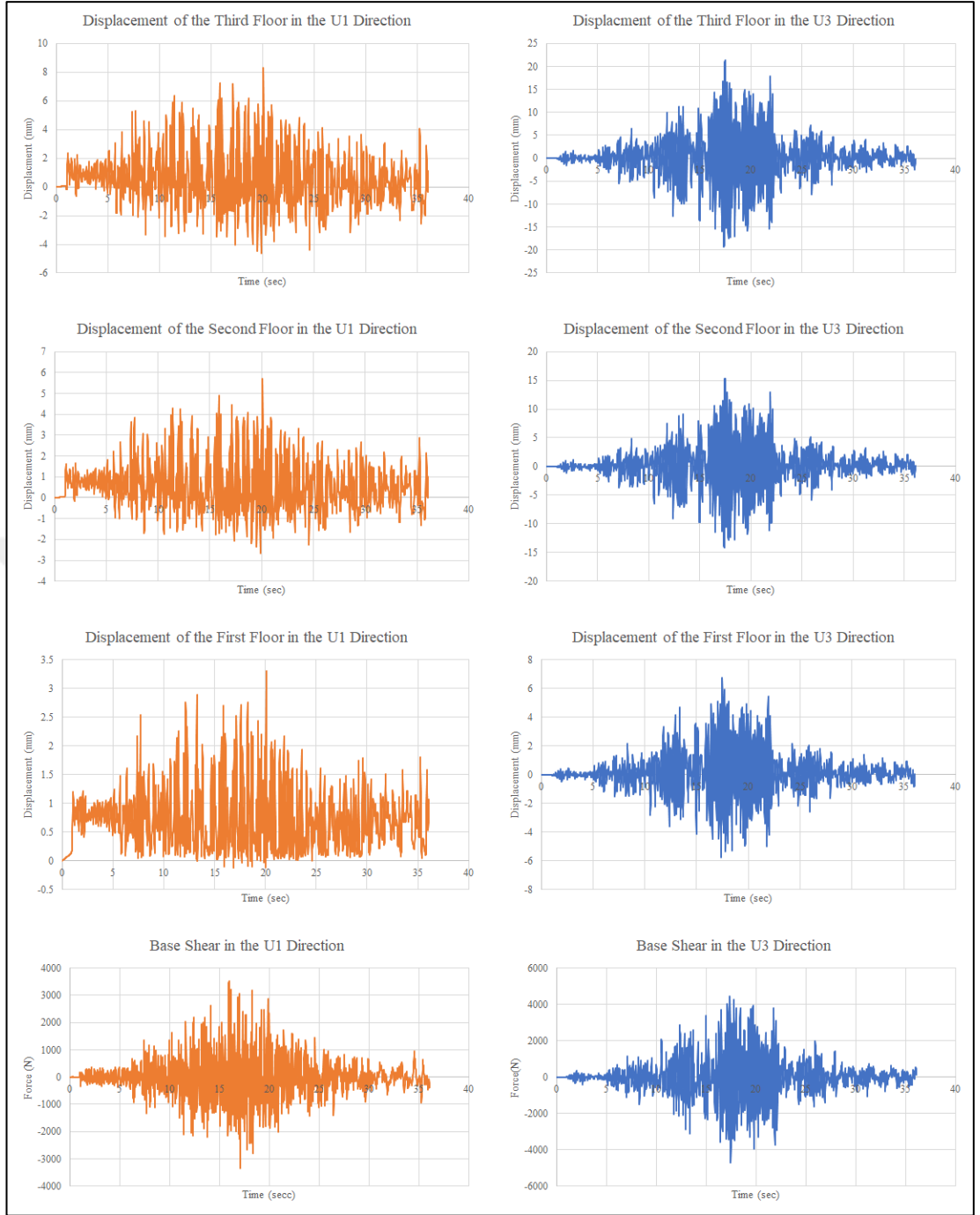
Şekil 4.1: Sisteme etkitilen 1 ve 2 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.



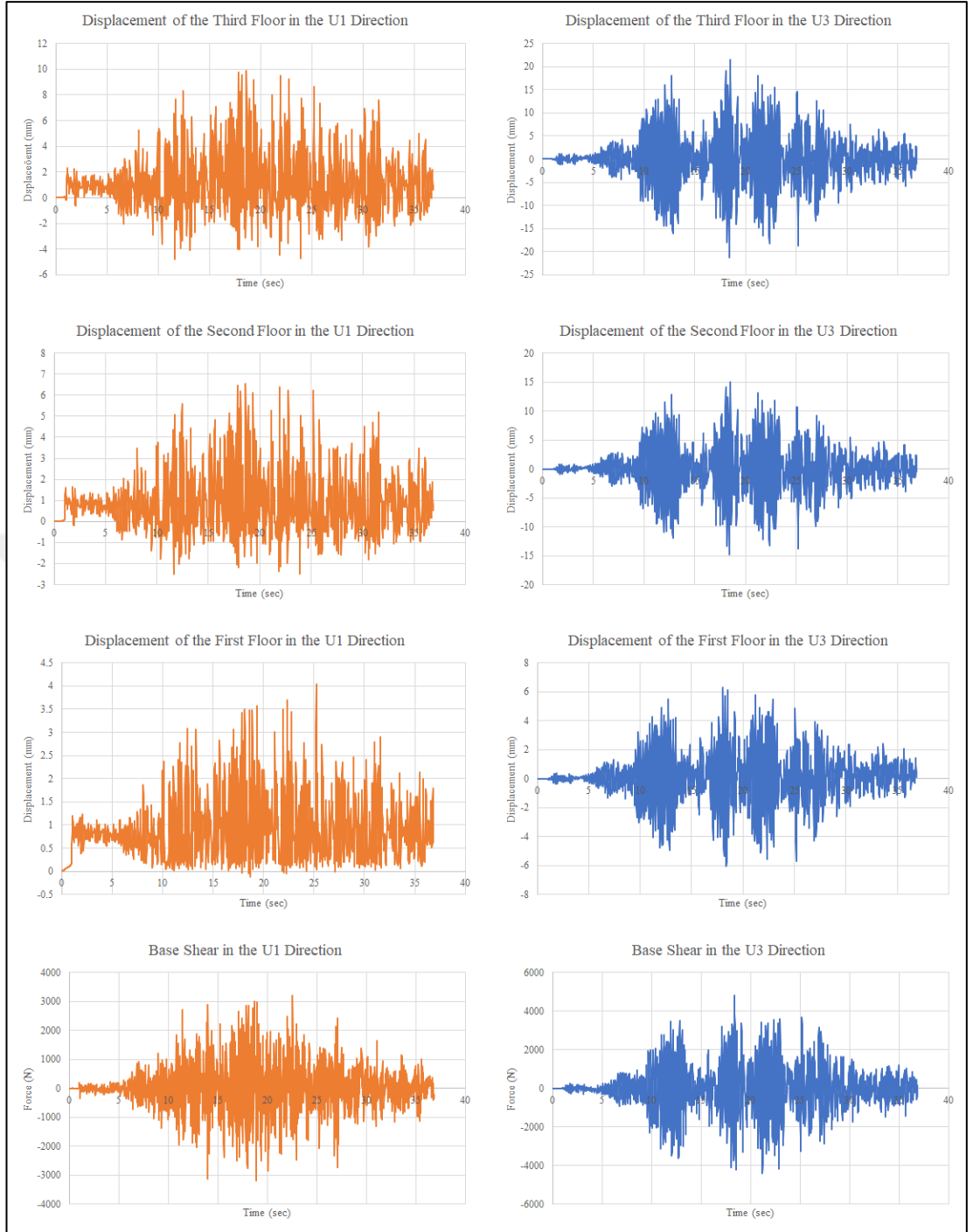
Şekil 4.2: Sisteme etkitilen 3 ve 4 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.



Şekil 4.3: Sisteme etkililen 5 ve 6 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.



Şekil 4.4: Sisteme etkitilen 7 ve 8 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.



Şekil 4.5: Sisteme etkitilen 9 ve 10 numaralı deprem kayıtlarının yer değiştirme ve taban kesme değerleri.

Bu sayısal verilerden ve grafiklerden hareketle doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analizler sonuçlandırılmış olup endüstriyel depo raf sistemlerinin artırılmış dinamik analizlerine geçilecektir.

4.2. Artırılmış Dinamik Analiz

Artırılmış dinamik analiz (IDA), yapıların sismik yükler altındaki davranışının kapsamlı bir değerlendirmesini yapmak için deprem mühendisliğinin hesaplamalı bir analiz yöntemidir. Statik itme analizinin dinamik eşdeğeri olarak kabul edilebilen artırılmış dinamik analiz, belirli bir yapının karşı karşıya olduğu sismik riski tahmin etmek için olasılıksal sismik tehlike analizinin sonuçlarına dayanmak üzere geliştirilmiştir.

IDA, her biri çeşitli sismik yoğunluk seviyelerine göre ölçeklendirilmiş bir dizi yer hareketi kaydı altında bir yapısal modelin birden fazla doğrusal olmayan dinamik analizini gerçekleştirmeyi içerir. Ölçeklendirme seviyeleri, yapıyı, elastikten elastik olmayana ve son olarak yapının esasen çökmeye maruz kaldığı genel dinamik kararsızlığa kadar tüm davranış aralığı boyunca zorlamak için uygun şekilde seçilir.

Bir yapıda sismik veya rüzgâr yüklerinden kaynaklanan yanal yüklemenin etkisini analiz ederken, kat kayması ve kat ötelenmesi grafikleri yapının durumu hakkında önemli bilgiler verir. Kat ötelenmesi, bir katın aşağıdaki kata göre yanal yer değiştirmesidir ve kat ötelenmesi oranı, kat ötelenmesinin kat yüksekliğine bölümüdür.

Sismik yükleme yönetmelikleri tipik olarak kat ötelemesine kat yüksekliğinin bir yüzdesi olarak sınırlar koyar ve bu nedenle kat ötelenme oranı, doğrudan yönetmelik gereklilikleriyle karşılaştırılabilecek yararlı bir niceliktir. Bir kat kayma oranı grafiği, belirli katların diğerlerinden daha fazla kayma yapıp yapmadığını gösterecek ve sertleştirmeye ihtiyaç duyabileceklerini vurgulayacaktır.

Bu bağlamda bu araştırmada ise deprem kayıtlarının spektral ivme değerleri 1 ile 6 arasında ölçeklendirilerek doğrusal olmayan zaman-tanım analizi sonucunda elde edilen deplasman değerleri ile önce görel kat öteleme değerleri, daha sonra kat öteleme oranları hesaplanmıştır.

4.2.1. U1 Yönündeki Görel Kat Öteleme Oranları İçin Artırılmış Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri

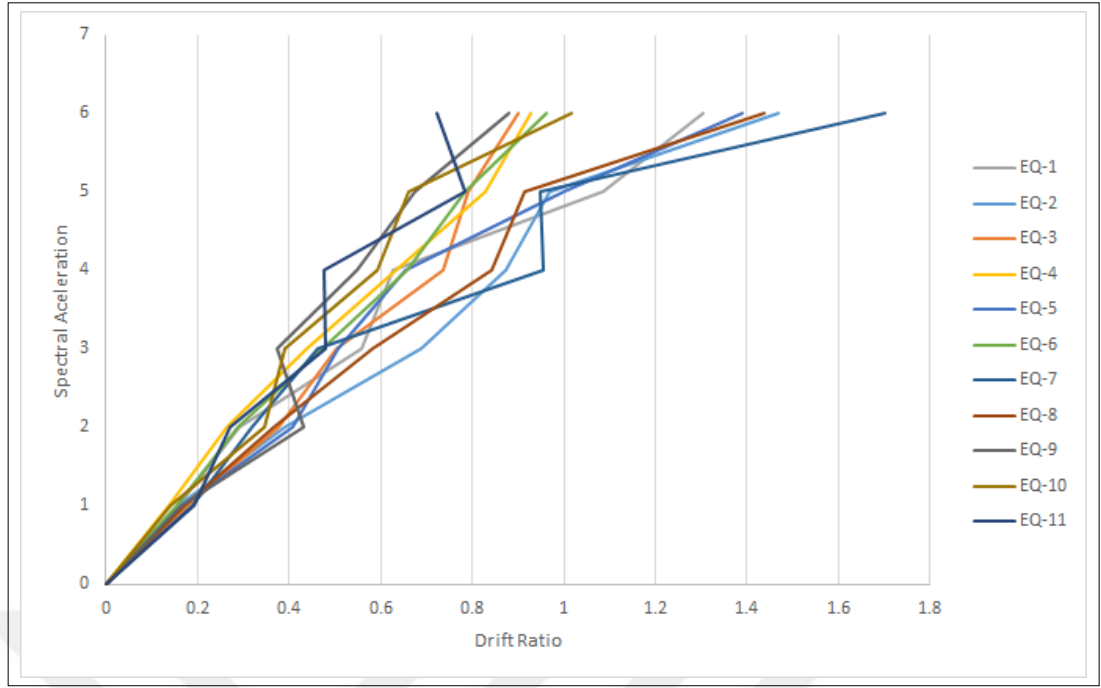
Endüstriyel depo raf sistemlerinin katlı yapısı düşünüldüğünde, U1 ve U3 olmak üzere her iki yön için de görel kat öteleme oranlarının hesaplanması, artırılmış dinamik analiz sonuçlarının elde edilmesi için elzemdir. Endüstriyel depo raf sisteminin down

aisle – yatay eksen yönü U1 olarak belirtilmektedir. Şekil 4.6’da U1 yönünde, deprem kayıtlarının yapıya etkililmesi ile elde edilen tepe deplasman değerlerinin görelî kat ötelemesi oranına dönüştürülmesi ile elde edilmiş, dikey eksenin ölçeklendirilmiş spektral ivme değerleri, yatay eksenin ise görelî kat ötelemesi oranının olduğu, yapının üçüncü katını temsil eden artırımı dinamik analiz grafiğı görülmektedir.

Çalışmada elde veri olarak bulunan tüm deprem kayıtlarının etkililmesi sebebi ile deprem kayıtları aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 4.2: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkililen yönleri.

Deprem Kaydı	Kod	Etkiyen Yön
V3-RSN164_IMPVAL.L.H_H-CPE147	EQ-1	U1
V3-RSN832 LANDERS_ABY000	EQ-2	U1
V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR--L	EQ-3	U1
V3-RSN1762_HECTOR_ABY090	EQ-4	U1
V3-RSN1816_HECTOR_NPF180	EQ-5	U1
V3-RSN2107_DENALI_CARLO-90	EQ-6	U1
V3-RSN3757 LANDERS_NPF090	EQ-7	U1
V3-RSN3760 LANDERS_BLC270	EQ-8	U1
V3-RSN6901_DARFIELD_FD.CSN09W	EQ-9	U1
V3-RSN6949_DARFIELD_PEECN11W	EQ-10	U1
V3-RSN8597_SIERRA.MEX_CISWSHNE	EQ-11	U1



Şekil 4.6: Görelî kat öteleme oranının U1 yönündeki IDA grafiğı.

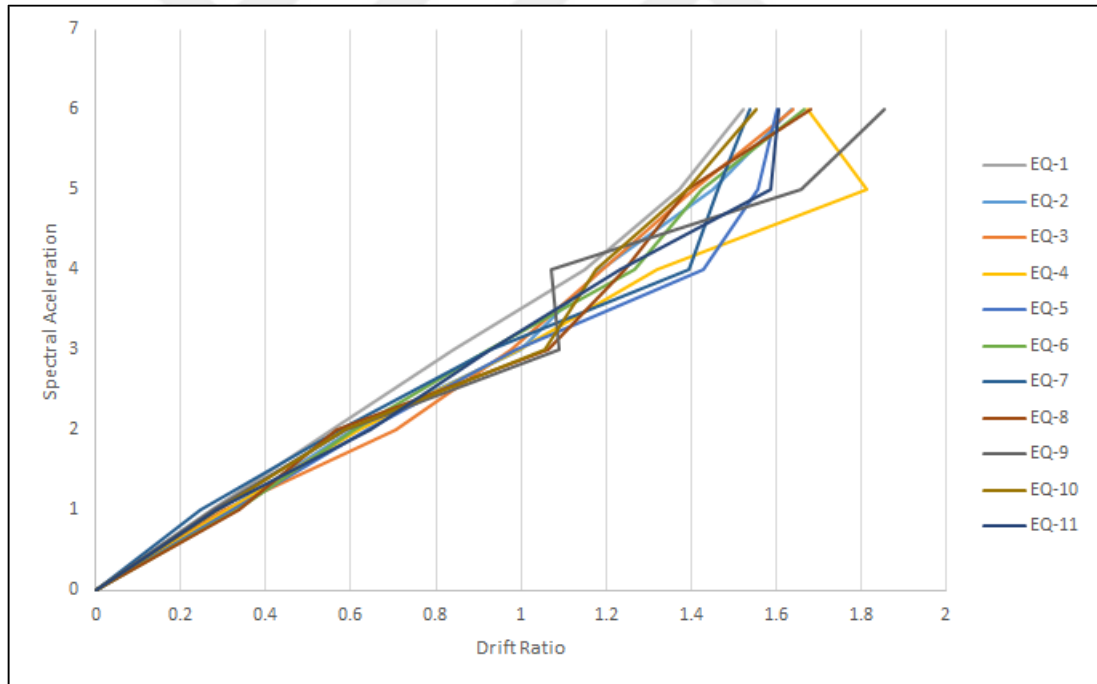
4.2.2. U3 Yönündeki Görelî Kat Öteleme Oranları İçin Artırımı Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri

Endüstriyel depo raf sistemlerinin katlı yapısı düşünüldüğünde, U1 ve U3 olmak üzere her iki yön için de görelî kat öteleme oranlarının hesaplanması, artırımı dinamik analiz sonuçlarının elde edilmesi için elzemdir. Endüstriyel depo raf sisteminin cross aisle – düşey eksen yönü U3 olarak belirtilmektedir. Şekil 4.7’de ise U3 yönünde, deprem kayıtlarının yapıya etkilmesi ile elde edilen tepe deplasman değerlerinin görelî kat öteleme oranına dönüştürülmesi ile elde edilmiş, dikey eksenin ölçeklendirilmiş spektral ivme değerleri, yatay eksenin ise görelî kat öteleme oranının olduğu, yapının 3. katını temsil eden artırımı dinamik analiz grafiğı görülmektedir.

Çalışmada elde veri olarak bulunan deprem kayıtlarının etkilmesi sebebi ile deprem kayıtları aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 4.3: Deprem kayıtlarının isimlendirilmeleri ve etkitilen yönleri.

Deprem Kaydı	Kod	Etkiyen Yön
V3-RSN164_IMPVALL.H_H-CPE237	EQ-1	U3
V3-RSN832 LANDERS_ABY090	EQ-2	U3
V3-RSN1633_MANJIL_ABBAR--T	EQ-3	U3
V3-RSN1762_HECTOR_ABY360	EQ-4	U3
V3-RSN1816_HECTOR_NPF270	EQ-5	U3
V3-RSN2107_DENALI_CARLO360	EQ-6	U3
V3-RSN3757 LANDERS_NPF180	EQ-7	U3
V3-RSN3760 LANDERS_BLC360	EQ-8	U3
V3-RSN6901_DARFIELD_FDCSS81W	EQ-9	U3
V3-RSN6949_DARFIELD_PEECS79W	EQ-10	U3
V3-RSN8597_SIERRA.MEX_CISWSHNN	EQ-11	U3

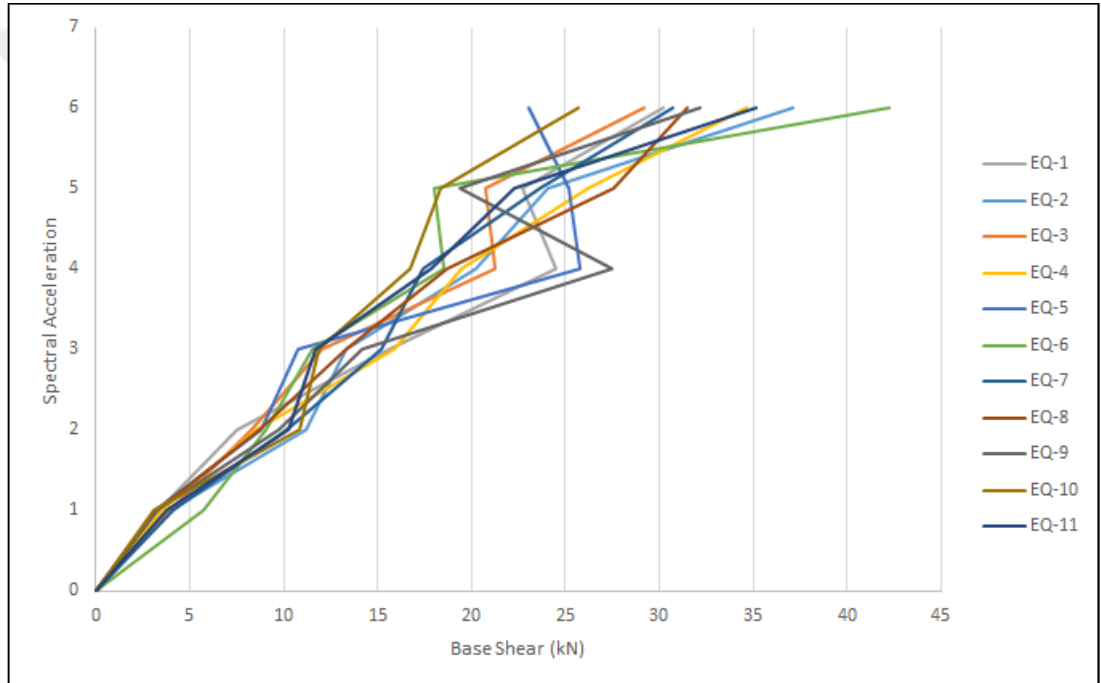


Şekil 4.7: Göreli kat öteleme oranının U3 yönündeki IDA grafiği.

4.2.3. U1 Yönündeki Taban Kesme Kuvvetleri İçin Artırılmış Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri

Endüstriyel depo raf sistemlerinin zeminle olan ilişkisi düşünüldüğünde, U1 ve U3 olmak üzere her iki yön için de taban kesme kuvvetlerinin hesaplanması elzem olmaktadır. Düşey eksenin ölçeklendirilmiş spektral ivme değerleri, yatay eksenin ise taban kesme kuvveti olduğu bu şekilde yapaya U1 doğrultusunda etki eden deprem kayıtlarının etkisi sonucu oluşturulan artırılmış dinamik analiz grafiği görülmektedir.

Çalışmada veri olarak bulunan tüm deprem kayıtları etkilendiği için deprem kayıtları Tablo 4.2'de gösterildiği gibi adlandırılmıştır.

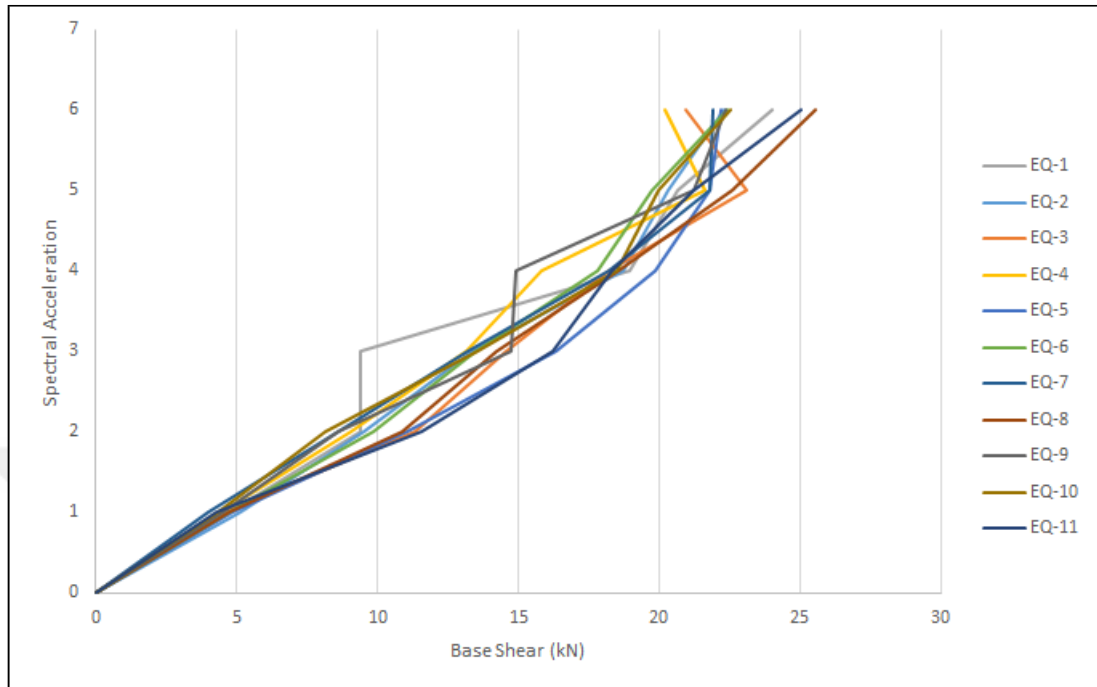


Şekil 4.8: Taban kesme kuvvetlerinin U1 yönündeki IDA grafiği.

4.2.4. U3 Yönündeki Taban Kesme Kuvvetleri İçin Artırılmış Dinamik Analiz Sonuçları ve Grafikleri

Endüstriyel depo raf sistemlerinin zeminle olan ilişkisi düşünüldüğünde, U1 ve U3 olmak üzere her iki yön için de taban kesme kuvvetlerinin hesaplanması elzem olmaktadır. Düşey eksenin ölçeklendirilmiş spektral ivme değerleri, yatay eksenin ise taban kesme kuvveti olduğu bu şekilde yapaya U3 doğrultusunda etki eden deprem kayıtlarının etkisi sonucu oluşturulan artırılmış dinamik analiz grafiği görülmektedir.

Çalışmada veri olarak bulunan tüm deprem kayıtları etkitildiği için deprem kayıtları Tablo 4.3'de gösterildiği gibi adlandırılmıştır.



Şekil 4.9: Taban kesme kuvvetlerinin U3 yönündeki IDA grafiği.

4.3. Plastik Enerji Yayılmı

Sucuoğlu ve Nurtuğ (1995), yapılardaki enerji dağılımının, geri dönüşü olmayan bir enerji harcama sürecinin sonucu olduğundan bahsetmiştir. Enerjinin dönüşümü ve dağılımı, elastik plastik bir malzeme içindeki kalıcı deformasyon ve hasar ile ilgilidir. Burada önemli olan, statik veya dinamik uyarımlar yoluyla elastik-plastik katılara giren mekanik enerjinin dağılmasıdır [15].

Sismik enerji girişi veya bir deprem sırasındaki sismik enerji dağılımı, deprem yer hareketinin hasar potansiyelini spektral ivmeden daha doğru bir şekilde temsil eder, çünkü sismik tepkiye ve bunun sonucunda yapısal hasara katkıda bulunan önemli uyarım ve sistem özelliklerinin etkilerini yansıtır.

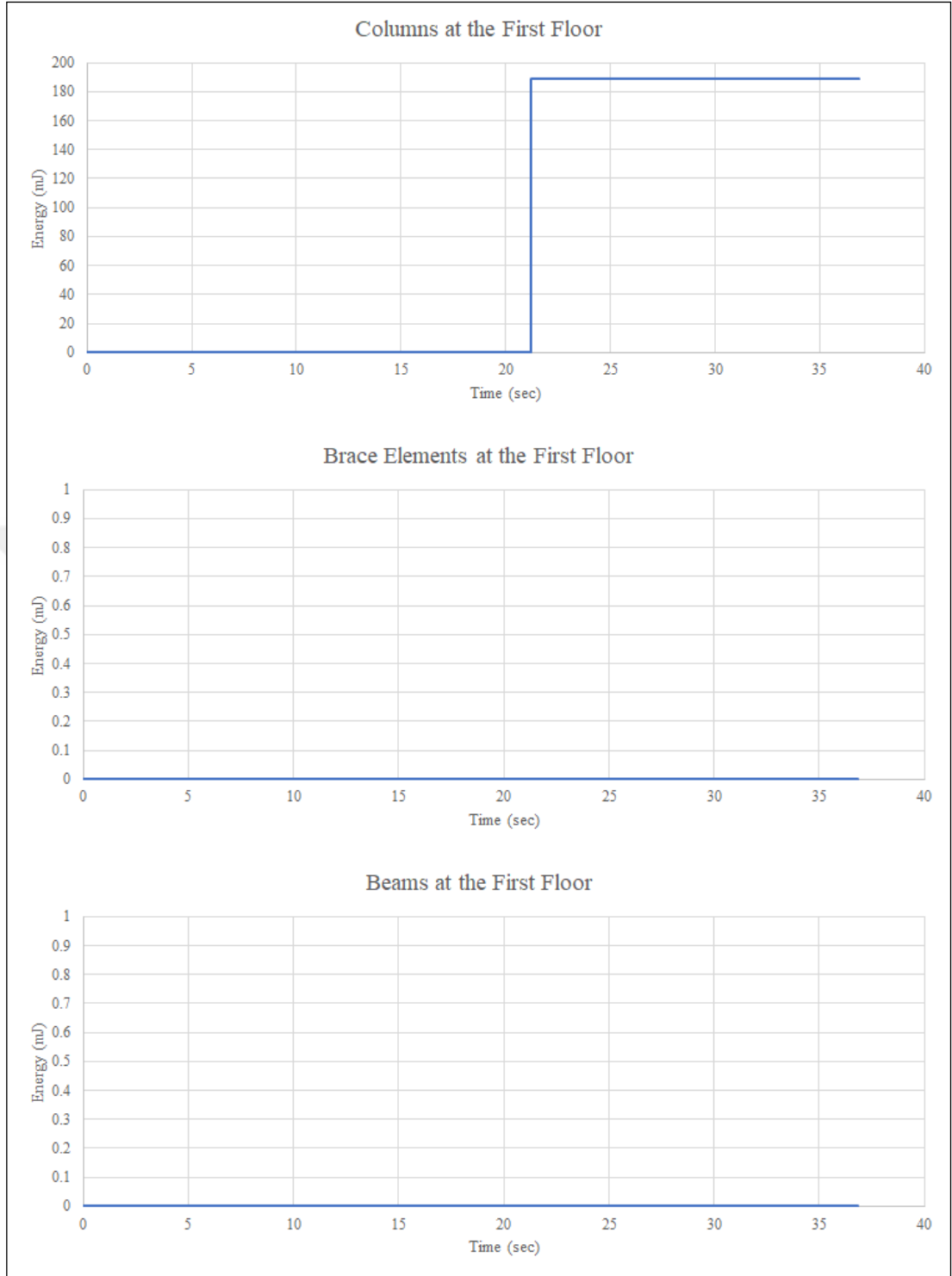
Sismik enerji yayılımının çeşitli yer hareketi ve sistem özelliklerine duyarlılığı bu çalışmada değerlendirilmiştir. Yer hareketlerinin hasar potansiyellerinin gözlemlenebilmesi için yapıda doğrusal olmayan davranışın görülmesi beklenmiştir.

Bu bağlamda spektral ivme değerleri ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapıya etkilerinin gözlemlenebilmesi için artırılmış dinamik analiz sonuçları incelenmiştir.

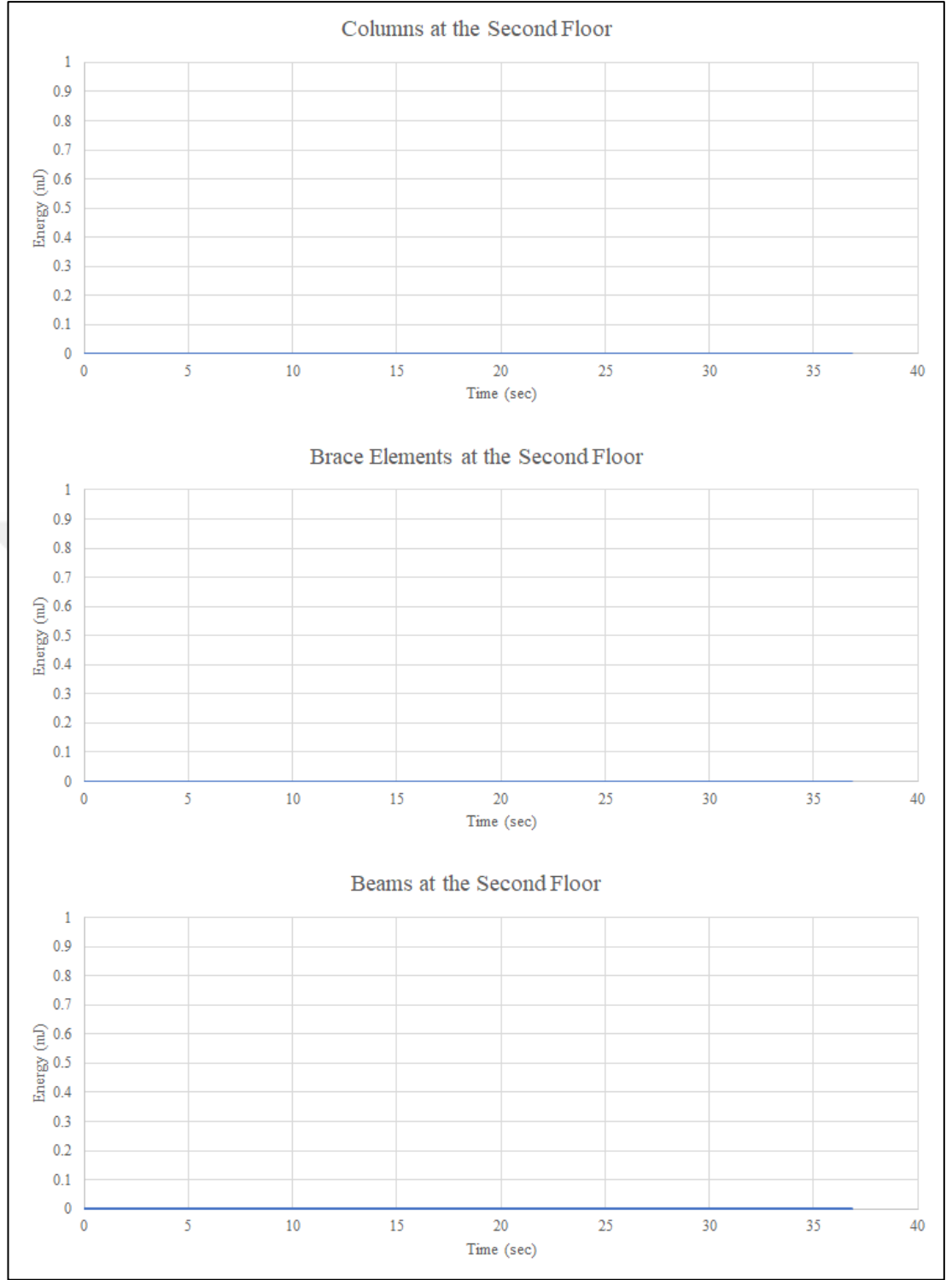
Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görüleceği üzere V3-RSN1816_HECTOR_NPF180 ve V3-RSN1816_HECTOR_NPF270 olarak isimlendirilmiş, spektral ivmeleri ölçeklendirilmiş, eş zamanlı olarak U1 ve U3 yönlerinde etkiyen bu deprem kayıtların sistemde bulunan tüm yapı elemanları kat sayılarına bağlı olarak gruplandırılması ile birlikte her bir kat ve yapı elemanı için enerji sönümleme grafikleri hazırlanmıştır.

Spektral ivme değerinin iki ve üç katı ile ölçeklendirilen deprem kayıtlarının etkimesi sonucu her iki deprem kaydının da yapının birinci katında enerji yayılımını gösterdiği, ikinci ve üçüncü katlarda yayılımın olmadığı görülmüştür.

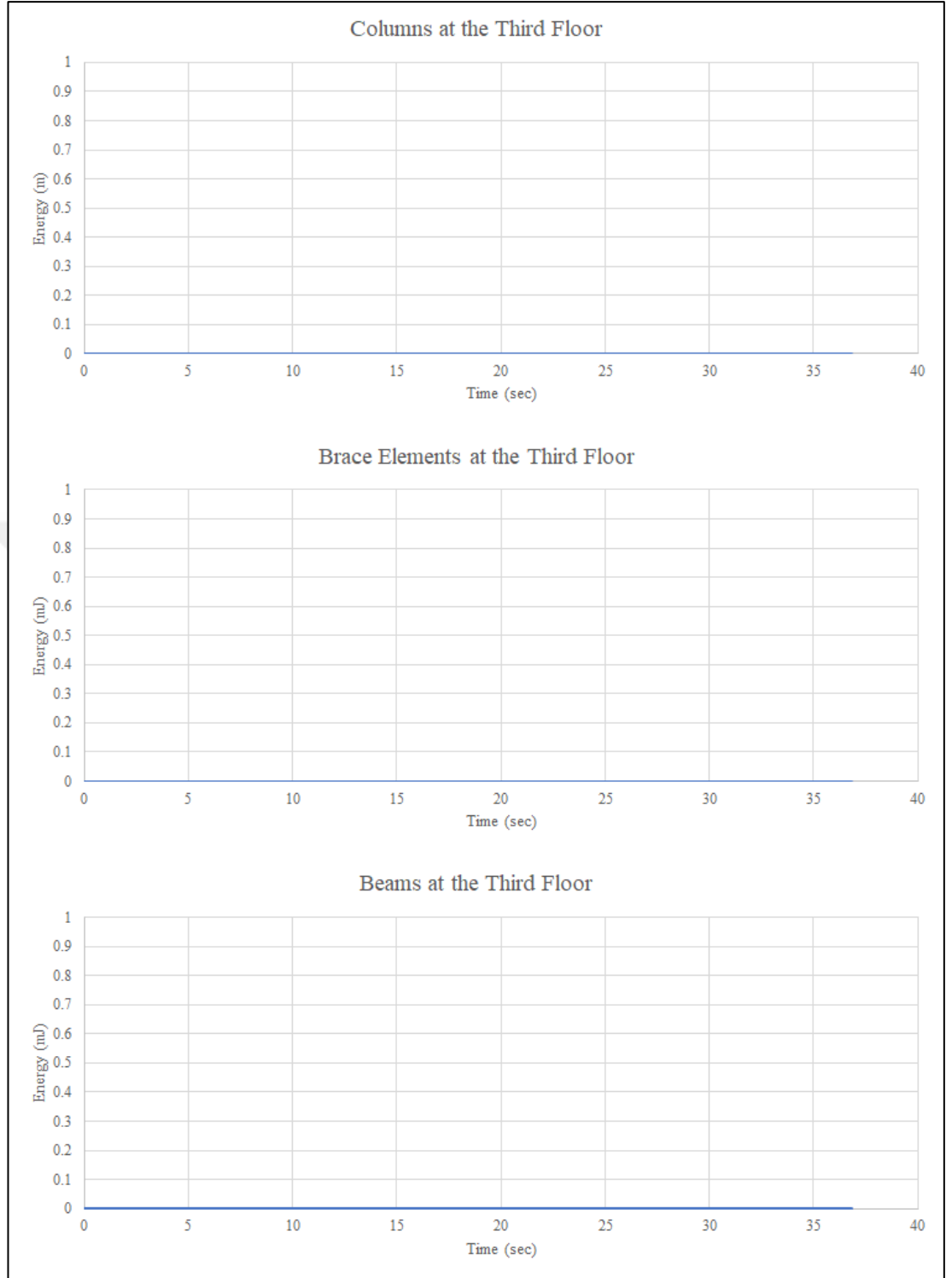




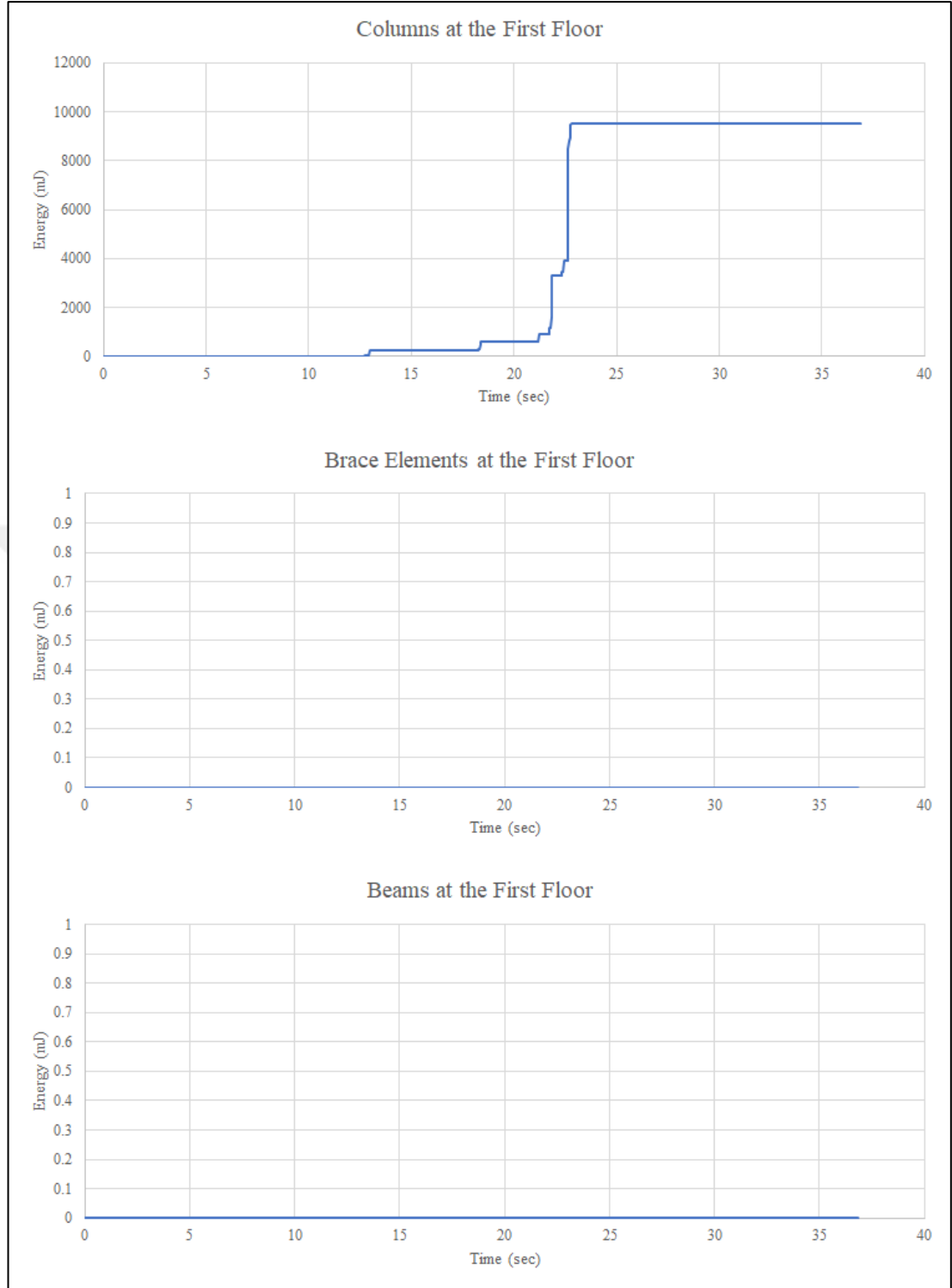
Şekil 4.10: Spektral ivmenin 2 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



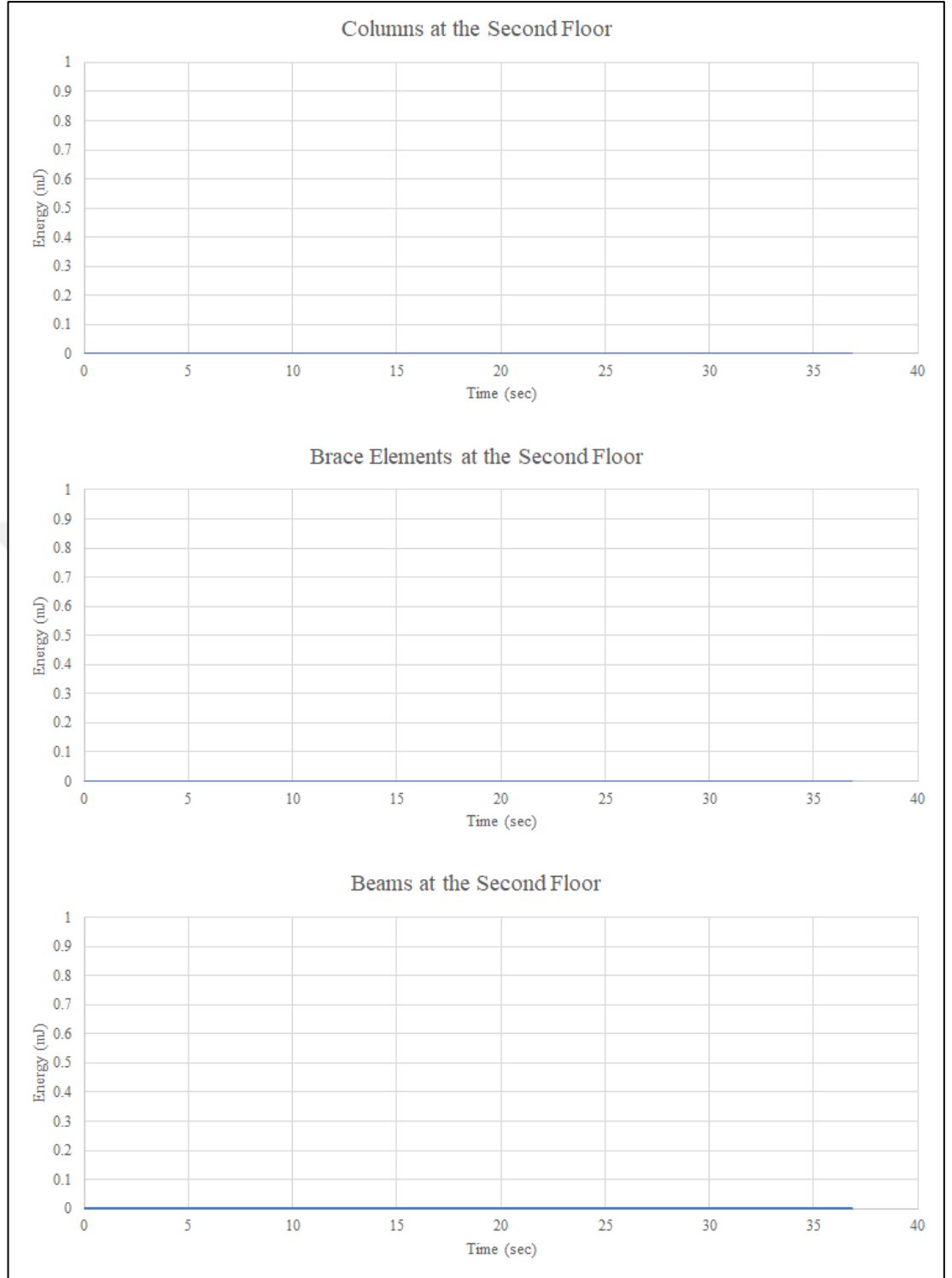
Şekil 4.11: Spektral ivmenin 2 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



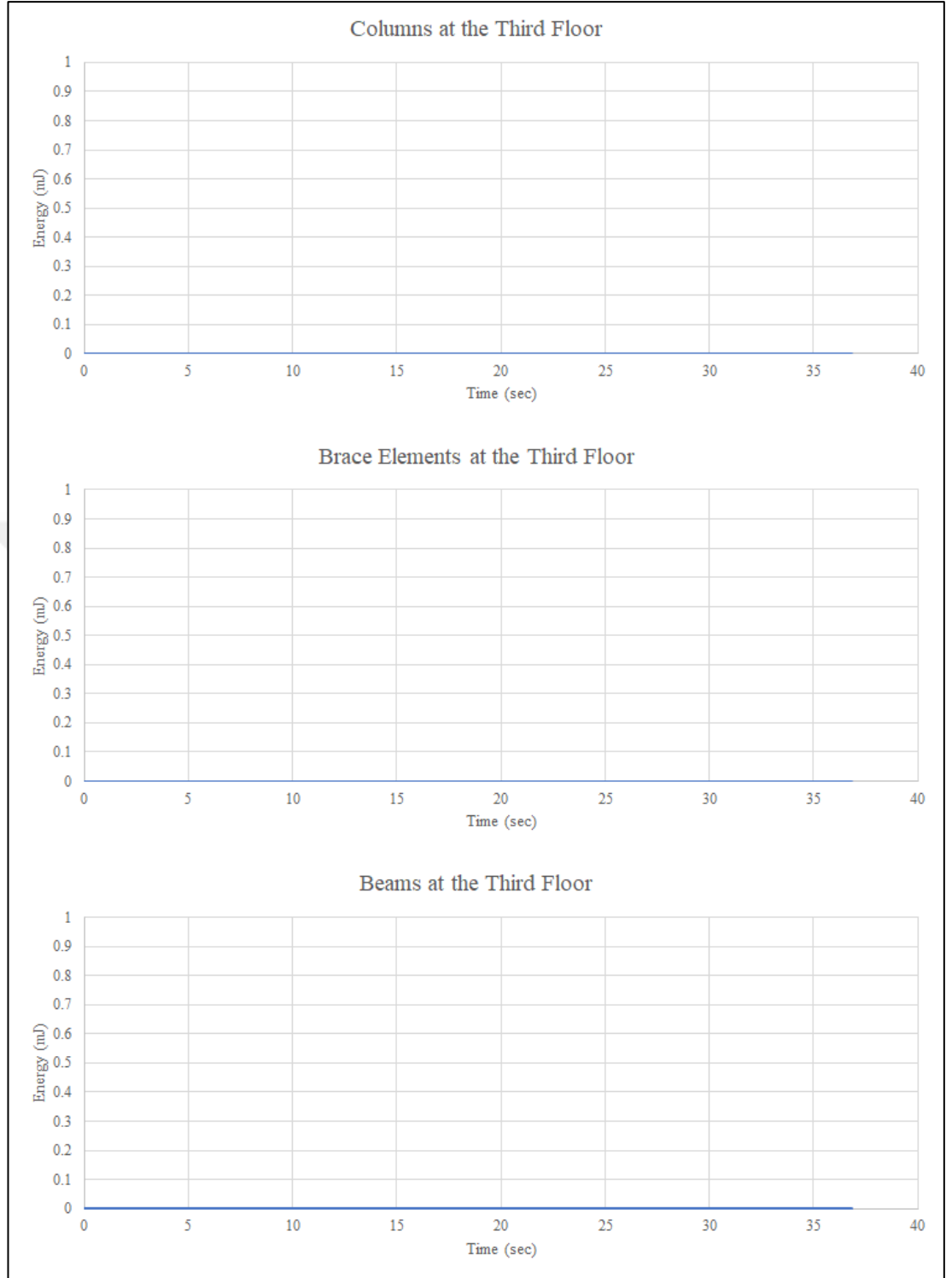
Şekil 4.12: Spektral ivmenin 2 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayımları.



Şekil 4.13: Spektral ivmenin 3 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

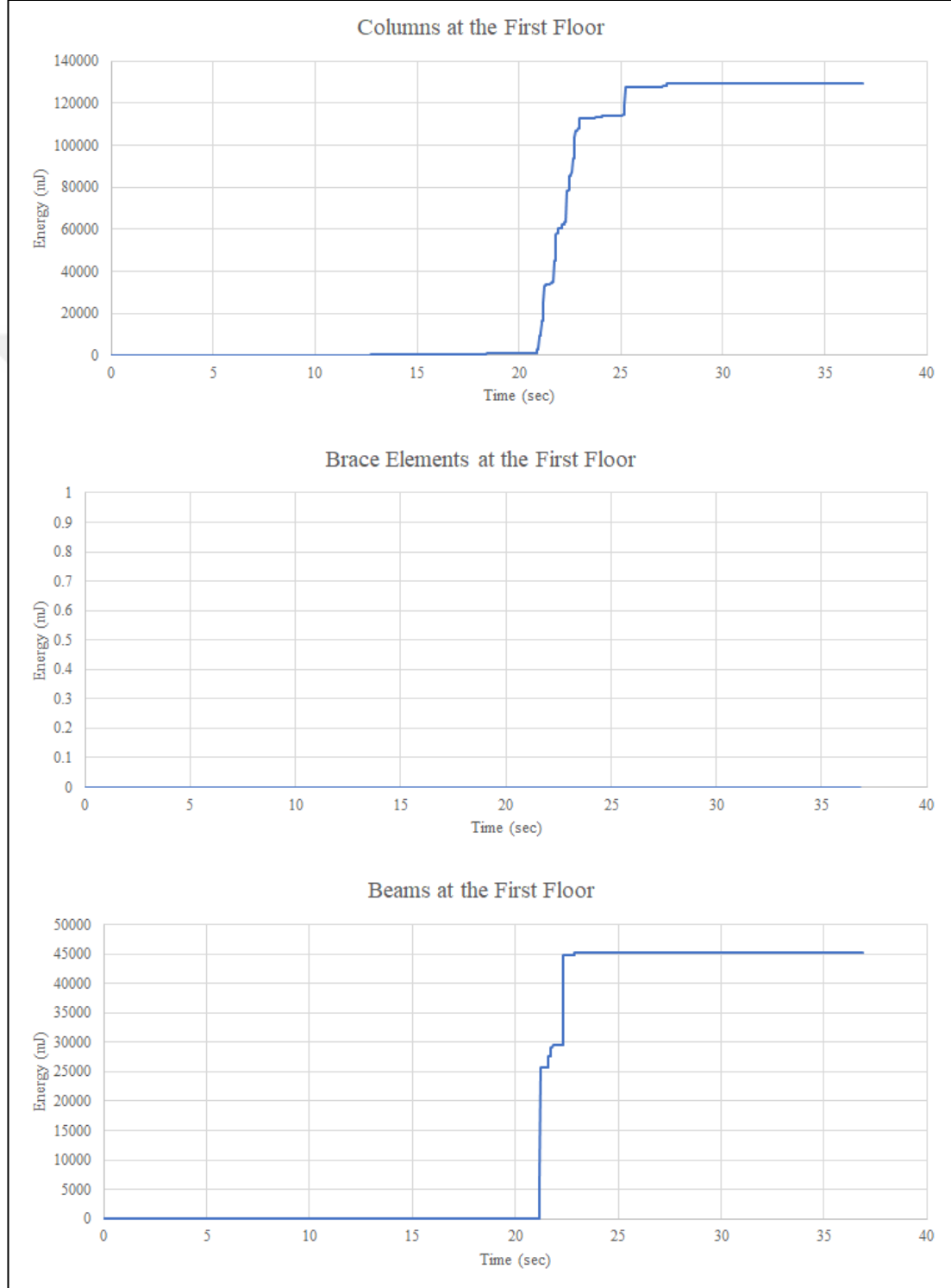


Şekil 4.14: Spektral ivmenin 3 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

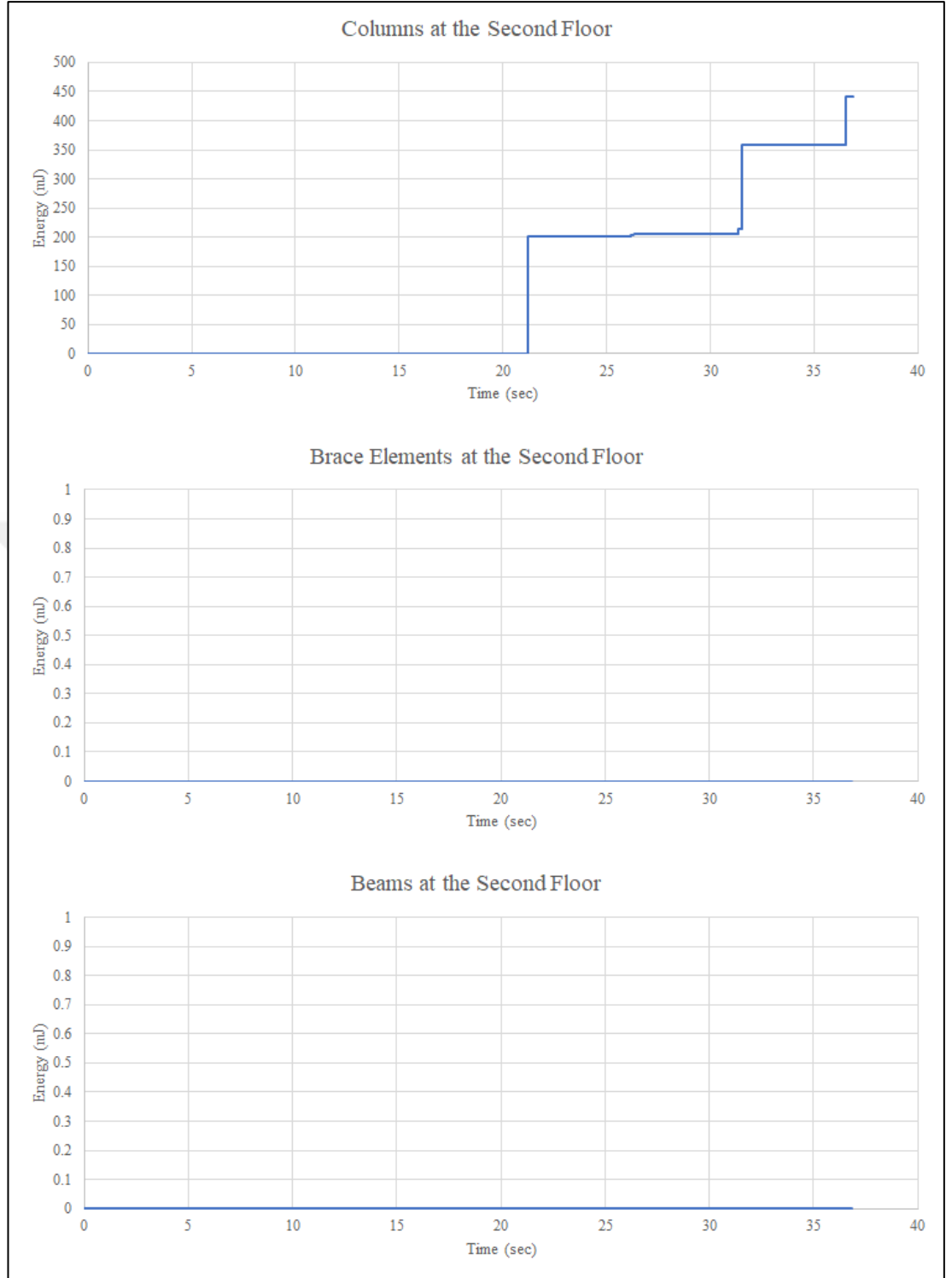


Şekil 4.15: Spektral ivmenin 3 ile ölçeklendirilmesi ile yapıya etkitilen deprem kayıtlarının yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

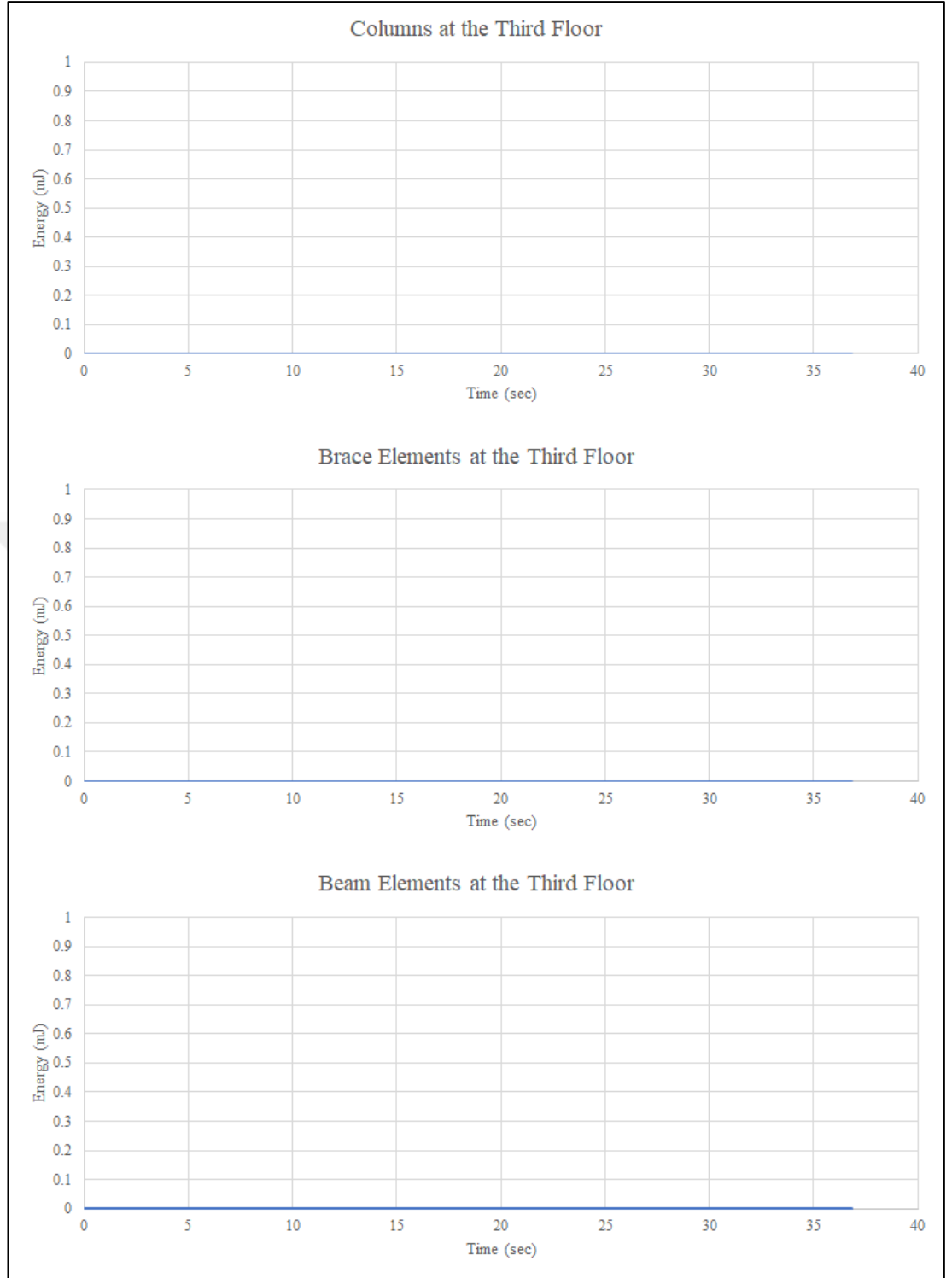
Spektral ivme değerinin dört katı ile ölçeklenen deprem kayıtları sisteme etkilediğinde Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de görülebileceği üzere, her iki deprem kaydı için de binanın tüm katlarında enerji yayılımı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.16: Spektral ivmenin 4 ile ölçeklendirilmesi ile yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

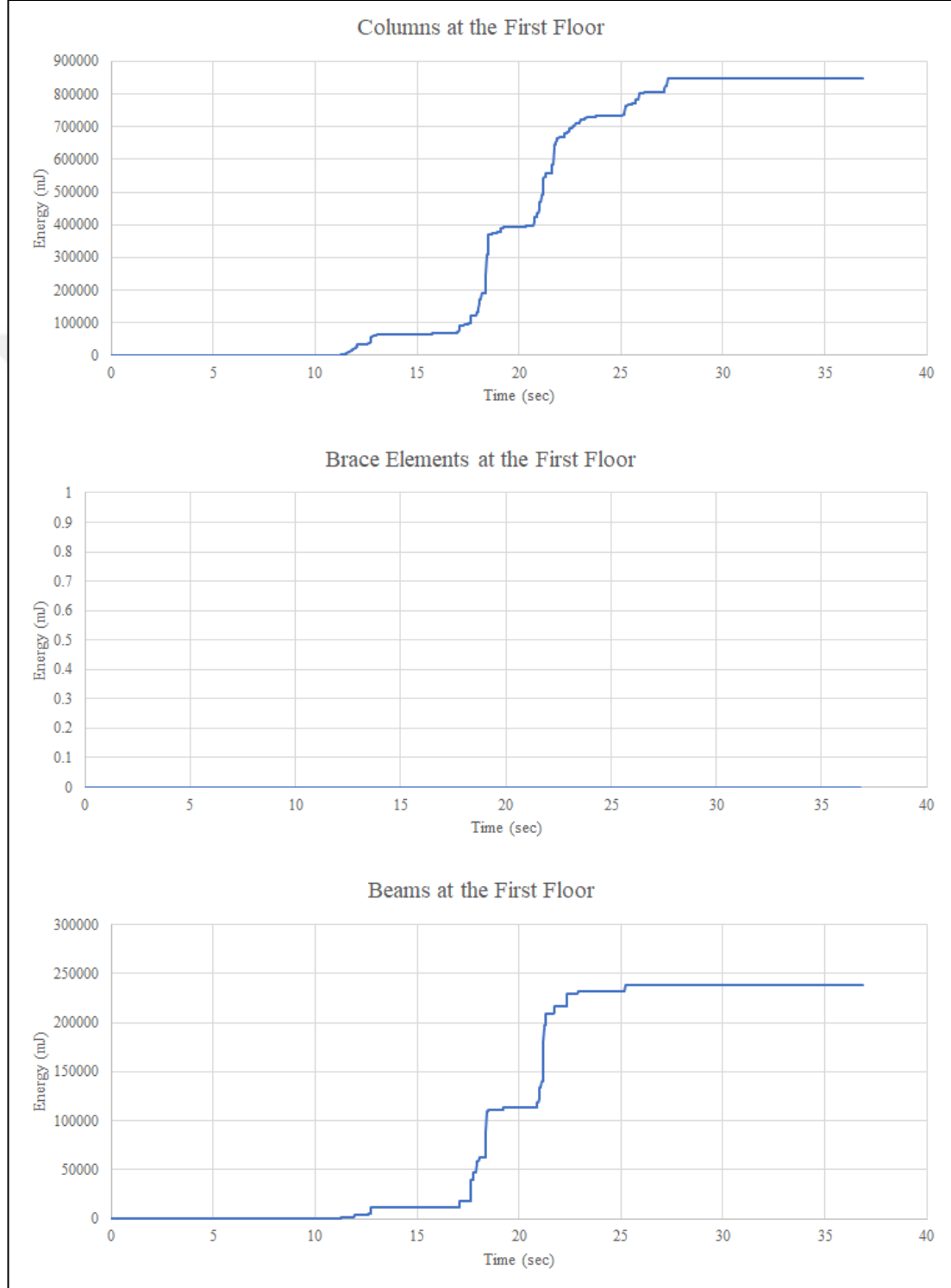


Şekil 4.17: Spektral ivmenin 4 ile ölçeklendirilmesi ile yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

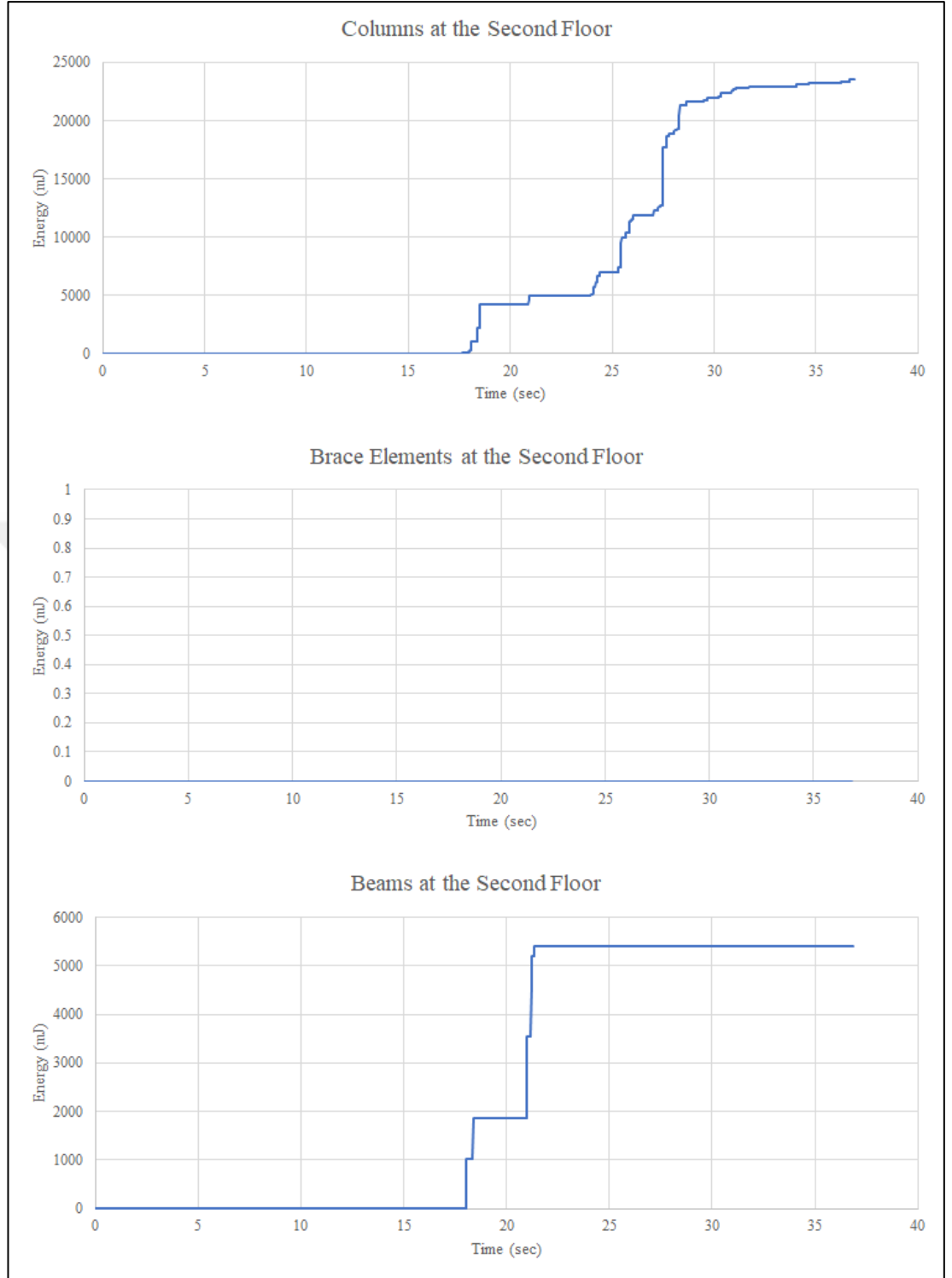


Şekil 4.18: Spektral ivmenin 4 ile ölçeklendirilmesi ile yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

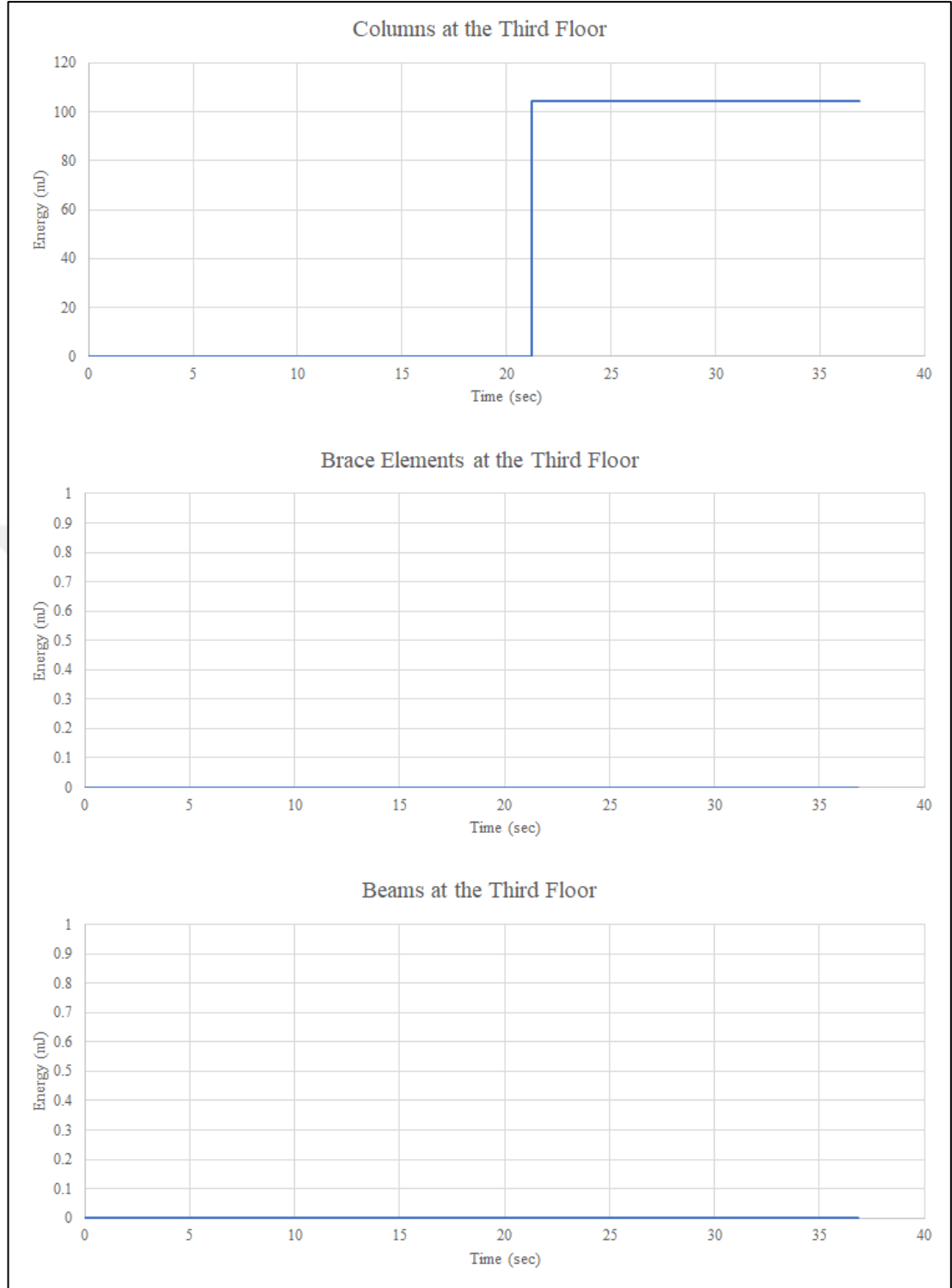
Spektral ivme değerinin beş ve altı katı ile ölçeklenen deprem kayıtları sisteme etkilediğinde Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te görülebileceği üzere, binanın tüm katlarında enerji yayılımı olduğu gözlenmiştir.



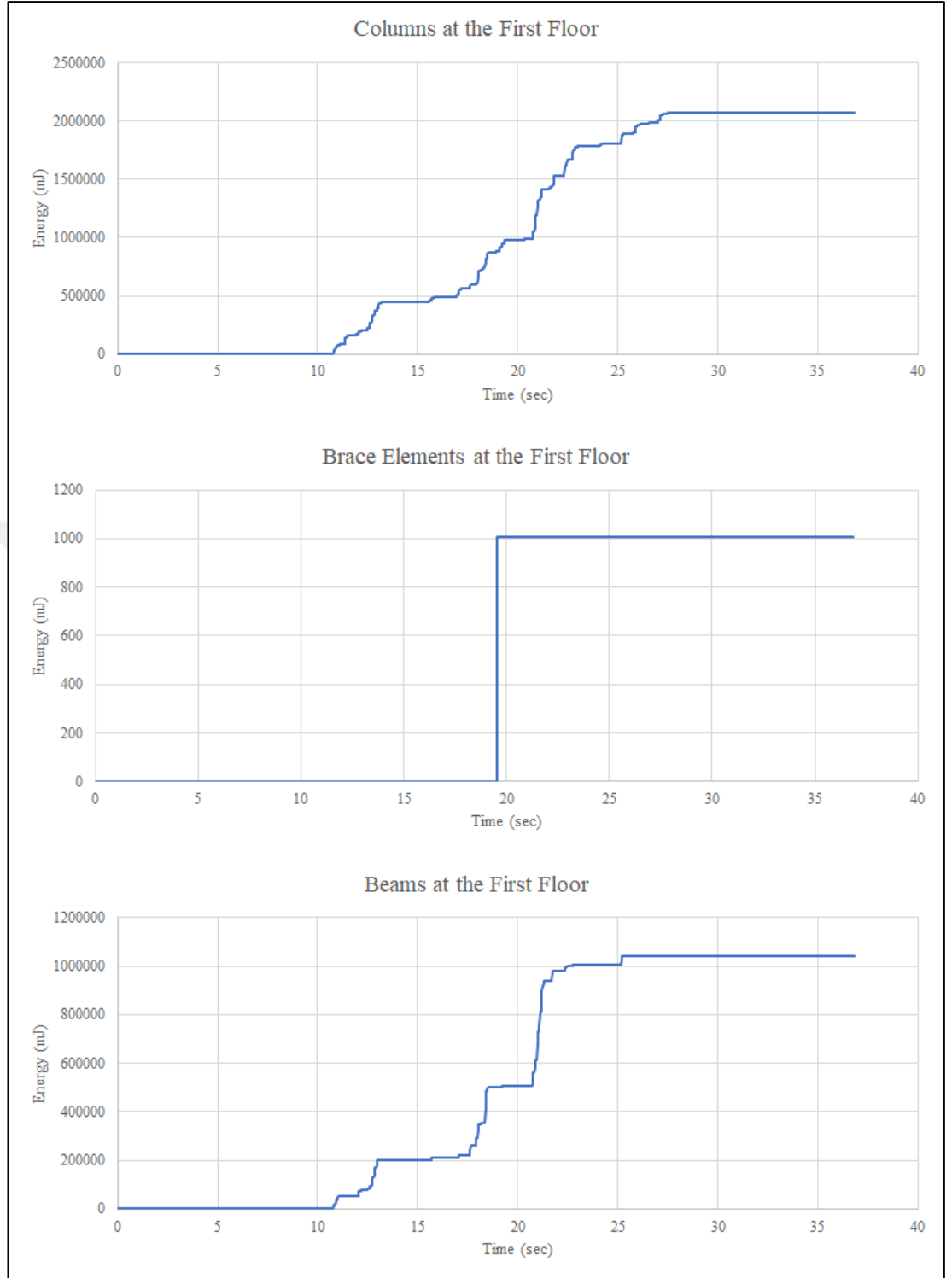
Şekil 4.19: Spektral ivmenin 5 ile ölçeklendirilmesi ile yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



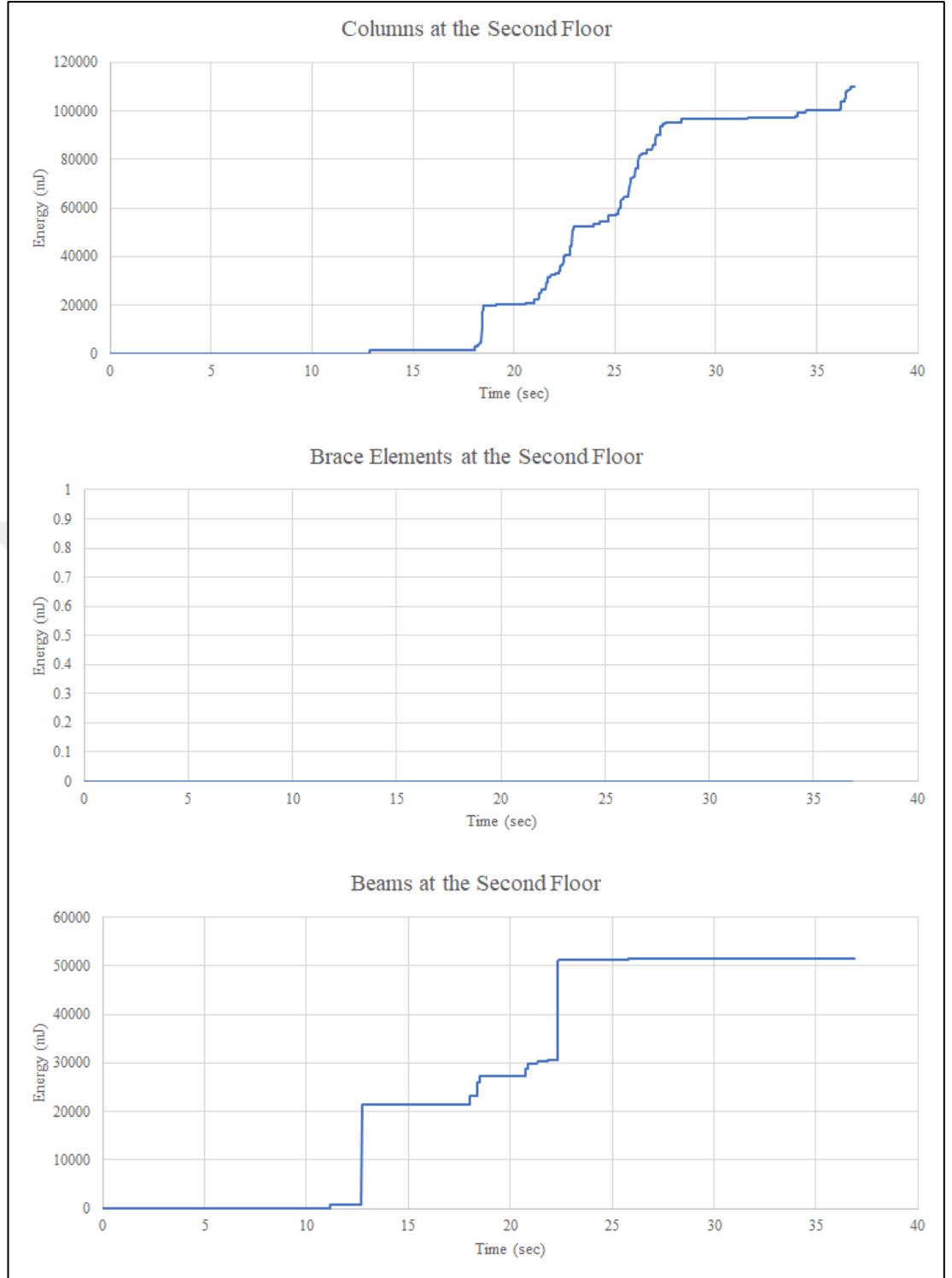
Şekil 4.20: Spektral ivmenin 5 ile ölçeklendirilmesi ile yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



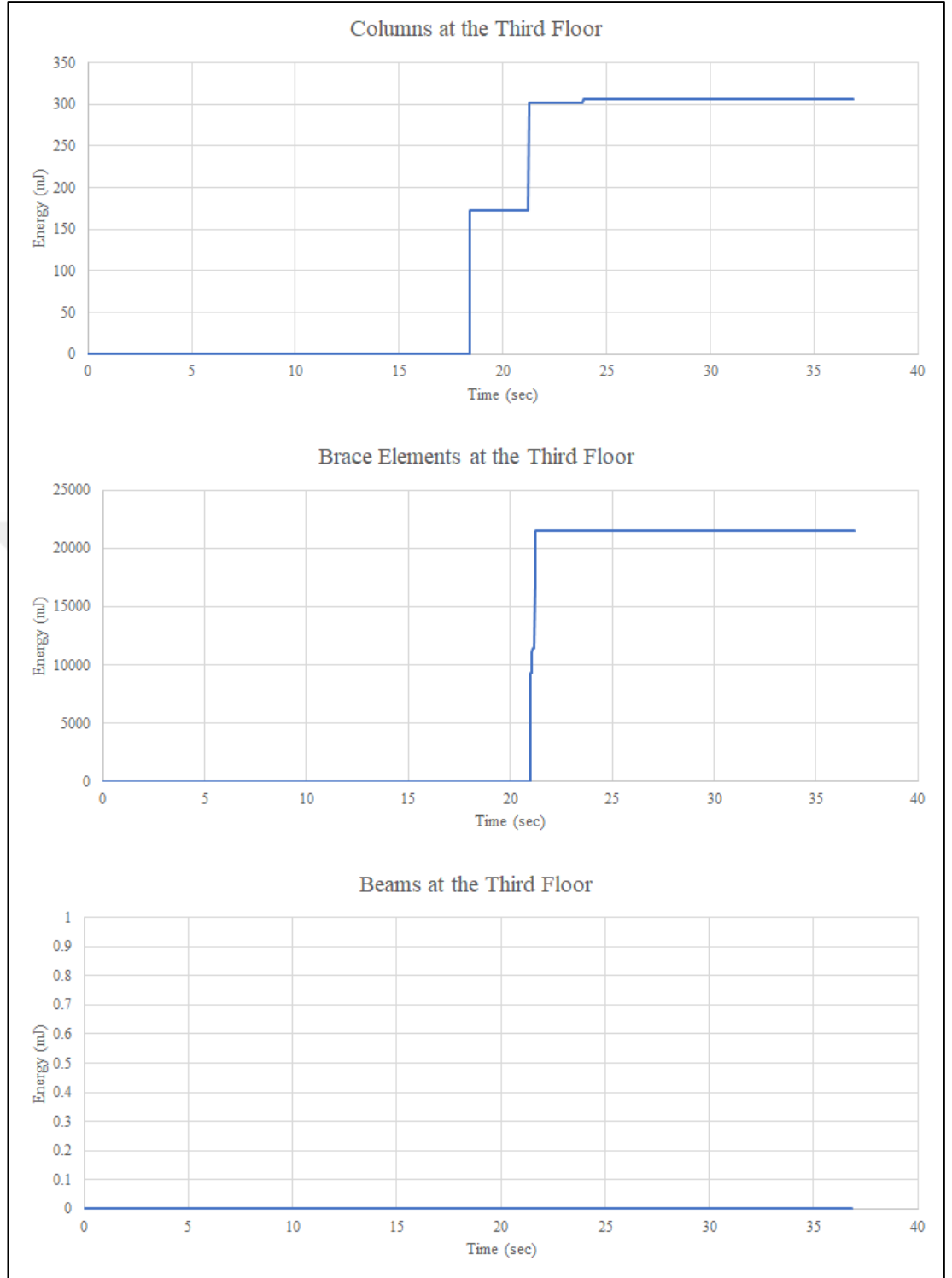
Şekil 4.21: Spektral ivmenin 5 ile ölçeklendirilmesi ile yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



Şekil 4.22: Spektral ivmenin 6 ile ölçeklendirilmesi ile yapının birinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



Şekil 4.23: Spektral ivmenin 6 ile ölçeklendirilmesi ile yapının ikinci katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.



Şekil 4.24: Spektral ivmenin 6 ile ölçeklendirilmesi ile yapının üçüncü katındaki oluşturduğu enerji yayılımları.

Yapılan tüm bu analizler sonrasında elde edilen sonuçların yorumlanması ve değerlendirilmesi; buradan hareketle çıkarımlar ile gelecek çalışmaların tartışılması bir sonraki bölümde gerçekleşecektir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

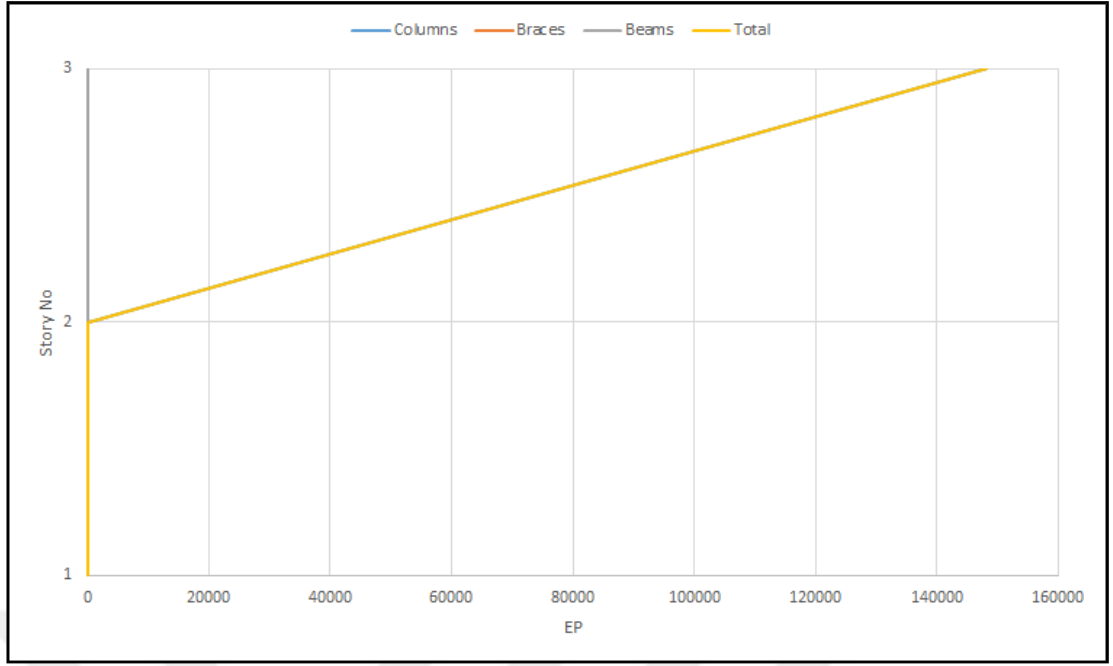
5.1. Sonuçların Yorumlanması

Bu tez çalışmasında endüstriyel depo raf sistemlerinin deprem kuvvetleri altındaki davranışlarının incelenmesi için birden farklı analiz çeşidi gerçekleştirilmiş olup her bir analiz sonucunun bir diğer analize referans olması hedeflenmiştir.

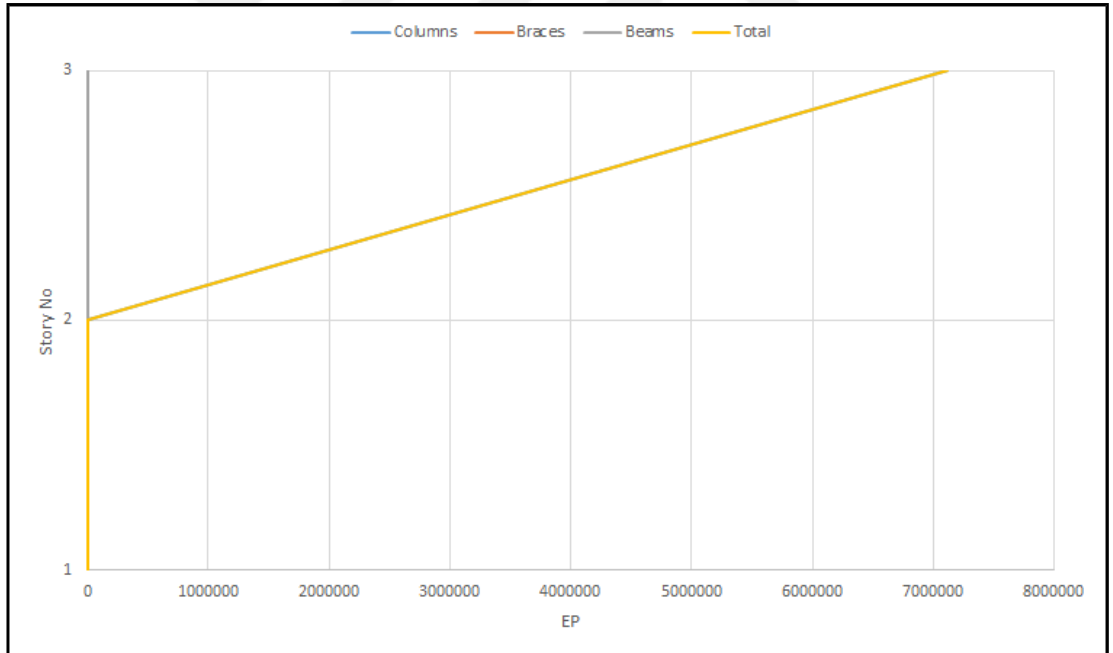
Bu bağlamda “nonlinear time history” analizi ile başlanan süreçte artırılmış dinamik analiz ile beraber yapıda doğrusal olmayan davranışlar gözlemlenmiştir. Doğrusal olmayan davranışların gözlemlenmesi ile birlikte enerji yayılım grafikleri hazırlanmıştır.

Bu grafikler sonucunda deprem kuvveti nedeniyle üretilen enerjinin büyük bir kısmının birinci kattaki kolonlara ve oradan da kirişlere yayıldığı görülmüştür. Öte yandan çapraz elemanlarda birim olarak diğer yapı elemanlarına göre çok küçük yayılmaların olduğu ve bu yayılmanın ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır.

V3-RSN1816_HECTOR_NPF180 ve V3-RSN1816_HECTOR_NPF270 isimli deprem kayıtlarının spektral ivme değerlerinin 2 ile ve 3 ile ölçeklendirilip yapıya etkilmesi sonucunda deprem kuvvetinin ortaya çıkarmış olduğu enerjinin tamamının 2 ile ölçeklendirilmiş deprem kuvveti için yapıya etkimesinin 20. saniyesinden sonra birinci katta bulunan kolonlara, 3 ile ölçeklendirilmiş deprem kuvveti için yapıya etkimesinin yaklaşık olarak 10. saniyesinden sonra birinci katta bulunan tüm kolonlara yayıldığı Şekil 5.1’de ve Şekil 5.2’de görülmüştür.

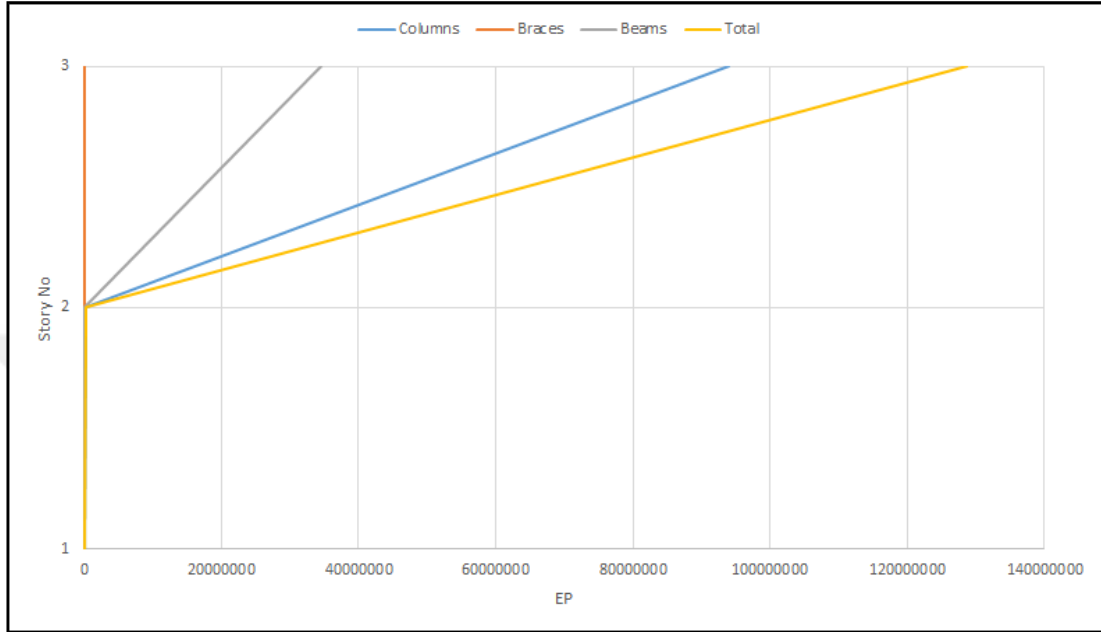


Şekil 5.1: Spektral ivmenin 2 ile ölçeklendirilmesi ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.



Şekil 5.2: Spektral ivmenin 3 ile ölçeklendirilmesi ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.

Aynı deprem kayıtlarına ait spektral ivme değerlerinin 4 ile ölçeklendirilip yapıya etkilmesi durumunda ortaya çıkan bu enerjinin deprem kuvvetinin yapıya etkimesinin yaklaşık olarak 20. Saniyesinden sonra birinci katta bulunan kolonlar ve kirişler ile ikinci katta bulunan kolonlara yayıldığı Şekil 5.3'te görülmüştür.

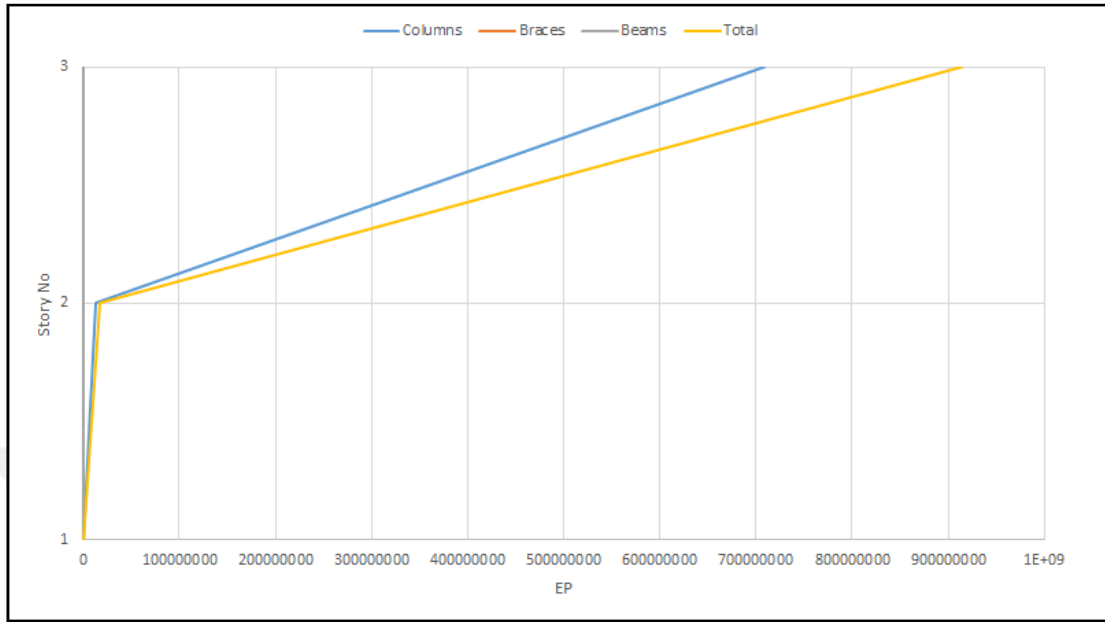


Şekil 5.3: Spektral ivmenin 4 ile ölçeklendirilmesi ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.

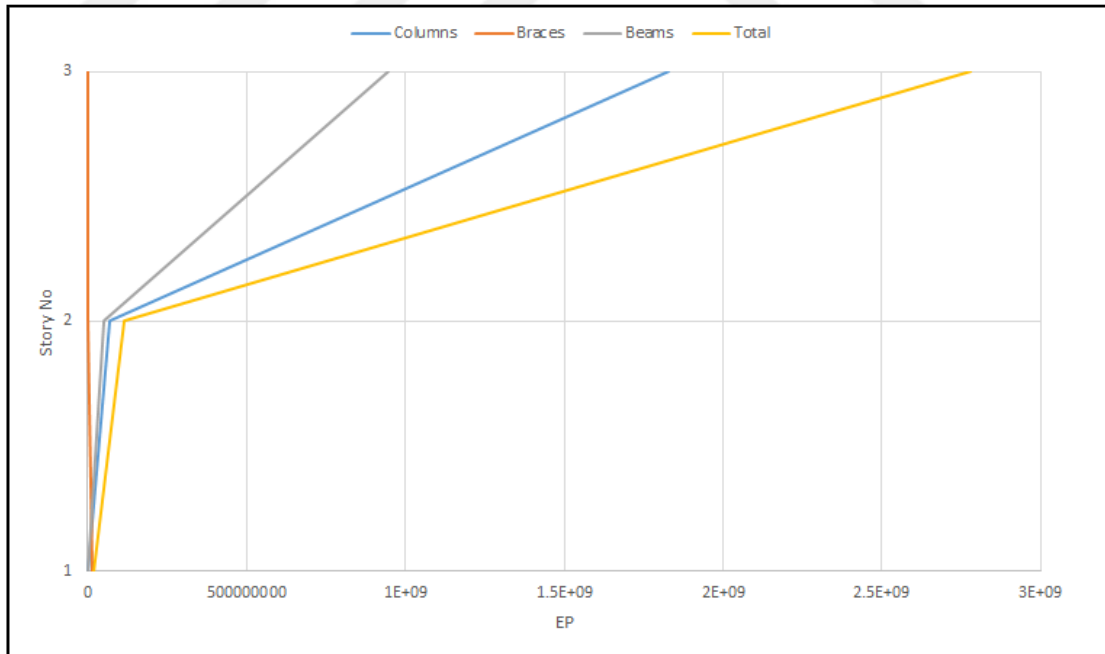
Deprem kayıtlarının 5 ve 6 ile ölçeklendirilip yapıya etkilmesi durumunda yapıda bulunan tüm elemanlara enerjinin yayıldığı görülmüştür. 5 ile ölçeklendirilmiş deprem kaydının yapıya etkilmesinden sonra yaklaşık 10. saniyeden sonra birinci katta bulunan kolonlarda ve kirişlerde enerjinin yayıldığı görülmüştür. Deprem kaydının 15. saniyesinden sonra ise ikinci katta bulunan kolonlarda ve kirişlerde enerji yayılımı gözlemlenmiştir. Deprem kuvvetinin 20. saniyesinden sonra ise üçüncü katta bulunan kolonlarda enerji yayılımının olduğu, çapraz elemanlarda ve kirişlerde herhangi bir yayılımın olmadığı görülmüştür.

6 ile ölçeklendirilmiş deprem kaydında ise yapıya etkilmesinden yaklaşık 10 saniye sonra birinci katta, merteye olarak ihmal edilebilecek düzeyde olsa da çapraz elemanlarda da, tüm yapı elemanlarında enerjinin yayıldığı görülmüştür. 10 ile 15. saniyeler arasında enerji yayılımının ikinci katta olduğu, 15. saniyeden sonra üçüncü katta enerji yayılımının olduğu gözlemlenmiştir.

Bu analizler sonucunda enerjinin yayılımı için Şekil 5.4'te ve Şekil 5.5'te görüldüğü üzere bir grafik hazırlanmıştır.



Şekil 5.4: Spektral ivmenin 5 ile ölçeklendirilmesi ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.



Şekil 5.5: Spektral ivmenin 6 ile ölçeklendirilmesi ile tüm yapı elemanlarında meydana gelen enerji yayılımları.

Analizler sonucunda hazırlanan ve enerjinin yayılımını gösteren grafikler neticesinde sonuçların tartışılması ve gelecek çalışmaların değerlendirilmesi gerçekleştirilebilir.

5.2. Sonuçlar ve Çıkarımlar

Tez çalışması bağlamında yapılan tüm analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki şekilde listelenebilir:

- URGO tarafından tasarlanmış bu endüstriyel depo raf sisteminin zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu deprem kuvvetlerine karşı oldukça rijit davrandığı gözlemlenmiştir.
- Artırımlı dinamik analiz sonuçlarında yapıda doğrusal olmayan davranışlar gözlemlenmiş olup spektral ivme değerlerinin 7 ve daha üzeri bir şekilde ölçeklendirilmesi durumunda yapının geometrisinde bozukluklar meydana gelmektedir.
- Deprem kuvvetlerinin oluşturduğu enerjinin yayılımının gözlemlenebilmesi için yapıda doğrusal olmayan davranışın oluşması gerekmektedir.
- Spektral ivmesi ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının oluşturduğu enerji yapıda beklenildiği gibi öncelikle birinci katta bulunan yapı elemanlarına, daha sonrasında ikinci ve üçüncü katta bulunan yapı elemanlarına yayılmaktadır.
- Spektral ivmesi ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının oluşturduğu enerjinin yayılımı yapıda bulunan çapraz elemanlarda kolonlara ve kirişlere oranla çok düşük olduğundan ihmal edilebilir seviyede olduğu kanısına varılmıştır.

5.3. Gelecek Çalışmalar

Tez çalışmasının sonlanmasıyla endüstriyel depo raf sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi önderliğinde Abaqus ve SAP2000 programları ve Python yazılım dilinin eşliğinde sismik kuvvetler etkisi altındaki davranışları incelenmiş ve literatüre bu bağlamda bir katkı yapılması hedeflenmiştir.

Tez çalışmasının tüm strüktürüyle vardığı sonuçlardan hareketle, gelecekte yapılabilecek potansiyel çalışmalar ve açılımlar değerlendirilebilir. Yapılan tüm analizler sonucu gerçekleştirilen bu tez çalışmasının,

- Arıtmımlı dinamik analiz sonucunda elde edilen eğrilerin öteleme oranı ve taban kesme kuvvetine göre kırılmalılık eğrilerine dönüştürülmesi,
- Birleşim detaylarının Abaqus veya farklı bir sonlu elemanlar programında moment aktaran birleşim olarak kabul edilmesinden ziyade, “wire element” yerine “solid element” olarak üç boyutlu modellenip endüstriyel depo raf sisteminde yapılacak herhangi bir analiz ile daha doğru sonuçlar eşliğinde karşılaştırmaların yapılabileceğı,
- Elde edilen enerji yayılım grafikleri ile birlikte yapının hangi zaman aralığında enerji yayılımının olduğı gözlemlenebildiğinden depreme dayanıklı tasarım aşamasında bu detayların daha da irdelenebileceğı, buna bağılı olarak birtakım izolator veya sönüm gibi hesaplamalara yardımcı olabileceğı,

açılımlarıyla genişletilebileceğı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yu Wei-Wen, (2000), “Cold-Formed Steel Design”, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Zhao X., Wang T., Chen Y., Sivakumaran K. (2014). Flexural behavior of steel storage rackbeam-to-upright connections. Journal of Constructional Steel Research, 99, 161-175. doi:10.1016/j.jcsr.2014.04.007
- [3] Cheng B., Wu Z., (2015), “Investigation of Shear Stiffness of Spine Bracing Systems in Selective Pallet Racks”, The Open Construction and Building Technology Journal.
- [4] Branquinho M. A., Luiz Vieira Jr. C. M., Malite M., (2019), “Stability analysis of unbraced steel storage racks: discussions an alternatives”, Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, St. Louis, Missouri, USA, 2-5 April.
- [5] Elkadi B., (2019), “Behavior of Cold Formed, Thin-Walled, Rack Type Frames and Their Use in Building Structures”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi
- [6] Suresh Kumar J., Ramesh S., (2019), “Optimization of Steel Storage Rack Column and Its Performance Analysis”, International Research Journal of Multidisciplinary Technovation, 1 (6), 198-206.
- [7] Jaradat M., (2020), “Investigation of Industrial Storage Rack Systems Under Earthquake Loads”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [8] Yaşar H., Gönül E., Erdoğan B., (2018), İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Endüstriyel Raf Sistemlerinin Periyodik Kontrolü ve Önemi, Mühendis ve Makina.
- [9] Patwardhan P. S., Nalavde R. A., Kujawski D., (2019), “An Estimation of Ramberg-Osgood Constants for Materials with and without Luder’s Strain Using Yield and Ultimate Strengths”, 3rd International Conference on Structural Integrity, Funchal, Madeira, Portugal, 2-5 September.
- [10] Topçu M., Taşgetiren S., (1997), “İki Boyutlu Problemler İçin Sonlu Elemanlar Ağı Oluşturulması”, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 315-322
- [11] Billah K. Y., Scanian R. H., (1990), “Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure and Undergraduate Physics Textbooks”, Am. J. Phys., Vol. 59
- [12] Castiglioni C. A., Bernuzzi C., Hofföe,ster B., (2014), “Seismic Behaviour of Steel Storage Pallet Racking Systems (SEISRACKS2)”, European Commission, Belgium.

- [13] Chopra A. K., (2015). “Yapı Dinamiği, Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları”, Palme Yayıncılık.
- [14] Chen X, Duan J, Qi H, Li Y, (2014). “Rayleigh damping in Abaqus/Explicit Dynamic Analysis”. Applied Mechanics and Materials, 627, 288-294
- [15] Nurtuğ A., Sucuoğlu H., (1995), "Prediction of Seismic Energy Dissipation in SDOF Systems", Earthquake Engineering Dynamics, 1545.



ÖZGEÇMİŞ

Uygar KAYA, 2013 yılında başladığı Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü 2017 yılında başarı ile tamamlamıştır. Ardından akademik hayatına 2019 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deprem ve Yapı Mühendisliği bölümüne kabul alarak devam etmektedir. 2017 yılından bu yana çeşitli kurumlarda, ofis ve saha tecrübesi kazanarak mesleğini icra etmektedir.

