



# NÜKLEER SANTRAL YAPILARININ RASTGELE TİTREŞİM ANALİZİ

Gizem ÇAĞLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2024

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gizem ÇAĞLAR

07/08/2024

NÜKLEER SANTRAL YAPILARININ RASTGELE TİTREŞİM ANALİZİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Gizem ÇAĞLAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ChiChi, Kobe ve Kocaeli depremleri gibi büyük magnitüdü deprem hareketleri esas alınarak nükleer bir santral binasının deprem yükü altındaki rastgele titreşimleri incelenmiştir. Rastgele ve deterministik analiz yöntemleriyle nükleer bir santral yapısının deprem davranışı detaylı bir şekilde araştırılmış ve bu kapsamda karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın odak noktası, seçilen nükleer santral binasının deprem koşullarında maruz kaldığı titreşim analizi sonuçlarına dayanarak deprem etkilerini anlamak ve bu bilgiler ışığında söz konusu yapı sistemlerinin daha güvenli tasarımına katkıda bulunmaktır. Çalışma kapsamında, her üç depremin yapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, sert, orta ve yumuşak zemin türlerinde rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada filtre edilmiş beyaz gürültü modelini temel alan rastgele titreşim analizi teorisinden faydalanılmıştır. Filtre edilmiş beyaz gürültü (FEBG) modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan  $S_0$  katsayısı (ana kaya genlik ivmesi) her zemin cinsi için Stocal programı aracılığı ile hesaplanmıştır. Zemin cinslerinin yanı sıra çalışmada uzak ve yakın fay etkisi de araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar çerçevesinde gerçek deprem, filtrelenmiş yer hareketi modeli ve deterministik dinamik analiz sonuçları detaylı bir şekilde karşılaştırılmış, nükleer santral binası üzerinde gerilme ve yer değiştirme sonuçları kıyaslanarak yorumlanmıştır. Bu analizlerin sonuçları, çalışmanın temel bulgularını oluşturarak, rastgele titreşim analizi ile deterministik dinamik analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Böylece filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek deprem hareketini ne ölçüde yansıttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre, deprem yer hareketini modellemek için kullanılan FEBG modelinin, gerçek deprem hareketi etkisini modellemek için kullanılmasının uygun olacağı yönündedir. Gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonunun kullanılması durumunda hesapların güçleşeceği ve zaman alacağı düşünülürse, FEBG modelinin bir yaklaşım olarak kullanılması kabul edilebilirdir. Zemin tipi, fay uzaklığı ve analiz yöntemlerindeki farklılıkların, nükleer santral yapılarındaki sonuçları etkilediği de çıkan sonuçlar arasındadır.

Bilim Kodu : 91128  
Anahtar Kelimeler : Rastgele titreşim analizi, deterministik dinamik analiz, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli, nükleer santral binası  
Sayfa Adedi : 117  
Danışman : Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

# RANDOM VIBRATION ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANT STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Gizem AĞLAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2024

## ABSTRACT

In this thesis, random vibration analysis of a nuclear power plant building under earthquake loading are investigated based on large magnitude earthquake motions such as ChiChi, Kobe and Kocaeli. The earthquake effects of a nuclear power plant building are investigated in detail by random vibration and deterministic analysis methods and comparisons are made in this context. The focus of the study is to understand the earthquake effects based on the results of the vibration analysis of the nuclear power plant building under earthquake conditions and to contribute to the safer design of these structural systems in the light of this information. Within the scope of the study, random vibration analysis and deterministic dynamic analysis were performed on firm, medium and soft soil types to evaluate the effects of all three earthquakes on the structure. The random vibration analysis theory based on the filtered white noise model is utilized in the study. The  $S_0$  coefficient (bedrock amplitude acceleration) needed to create the filtered white noise (FEBG) model was calculated for each soil type using the Stocal program. In addition to soil types, near and far fault effects were also investigated in the study. Within the framework of the results obtained as a result of the research, the results of the real earthquake, filtered ground motion model and deterministic dynamic analysis were compared in detail, and the stress and displacement results on the nuclear power plant building were compared and interpreted. The results of these analyses constitute the main findings of the study, allowing the comparison of the results of random vibration analysis and deterministic dynamic analysis. Thus, it was tried to determine to what extent the filtered white noise model reflects the actual earthquake motion. According to the results of the study, it is concluded that the FEBG model used to model earthquake ground motion can be used to model the effect of real earthquake motion. Considering that the calculations will be difficult and time consuming if the spectral density function of the real earthquake motion is used, it is possible to use the FEBG model as an approach. It is also observed that the dynamic responses of nuclear power plant structures are sensitive to the soil type, fault distance and the used analysis method.

Science Code : 91128  
Key Words : Random vibration analysis, deterministic dynamic analysis,  
filtered white noise model, nuclear power plant  
Page number : 117  
Supervisor : Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

## TEŐEKKÖR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, hem ders hem de tez döneminde, bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, deneyimlerini, tecrübelerini ve bilgilerini paylaşan başta değerli danışmanım Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK'a ve Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü hocalarına yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Ayrıca eğitim hayatım boyunca beni sabır ve özveri ile destekleyip, bulunduğum noktaya getiren ve her zaman koşulsuz şartsız yanımda olan başta canım annem ve büyükbabam olmak üzere bütün aileme teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Nükleer Santral Yapılarının Rastgele Titreşim Analizi İle İlgili Çalışmalar.....	5
2.2. Nükleer Santral Yapılarının Yakın Fay Analizi İle İlgili Çalışmalar.....	8
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	11
3.1. Materyal ve Method.....	11
3.1.1. Rastgele titreşim analizi.....	11
3.1.2. Deterministik analiz.....	17
3.2. Nükleer Santral Binası.....	18
3.3. Malzeme Özellikleri.....	18
3.4. Nümerik Modelleme.....	21
3.4.1. Donatı ve beton katmanını içeren kabuk modeli.....	21
3.4.2. Yük ve sınır şartları.....	26
3.4.3. Modal özellikler.....	30
3.5. Deprem Kayıtları.....	31
4. ANALİZ SONUÇLARI.....	35
4.1. Chi-Chi Depremi.....	35

	<b>Sayfa</b>
4.1.1. Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme.....	50
4.1.2. Zemin cinsine göre değerlendirme.....	52
4.1.3. Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme..	53
4.2. Kobe Depremi.....	56
4.2.1. Yakın fay kayıtları.....	56
4.2.2. Uzak fay kayıtları.....	68
4.3. Kocaeli Depremi.....	78
4.3.1. Yakın fay kayıtları.....	78
4.3.2. Uzak fay kayıtları.....	90
4.4. Fay Uzaklığına Göre Değerlendirme.....	102
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	117

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Model zemin türleri için güç spektral yoğunluk parametreleri.....	15
Çizelge 3.2. Kobe ve Kocaeli depremleri için $S_0$ katsayısı değerleri.....	16
Çizelge 3.3. B50 sınıfı beton için malzeme özellikleri.....	19
Çizelge 3.4. Donatı çeliği için malzeme özellikleri .....	20
Çizelge 3.5. Santral binası modelinin doğal periyotları.....	30
Çizelge 3.6. ChiChi deprem kayıtlarına ait bilgiler.....	32
Çizelge 3.7. Kobe deprem kayıtlarına ait bilgiler (Yakın fay).....	32
Çizelge 3.8. Kocaeli deprem kayıtlarına ait bilgiler (Yakın fay).....	32
Çizelge 3.9. Kobe deprem kayıtlarına ait bilgiler (Uzak fay).....	33
Çizelge 3.10. Kocaeli deprem kayıtlarına ait bilgiler (Uzak fay).....	33
Çizelge 4.1. Analiz sonuçları .....	38
Çizelge 4.2. Analiz sonuçları.....	57
Çizelge 4.3. Analiz sonuçları.....	68
Çizelge 4.4. Analiz sonuçları.....	79
Çizelge 4.5. Analiz sonuçları.....	91

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Deprem ivme yer hareketi tanımlanması.....	14
Şekil 3.2 Santral yapısının kesit görünümü ve donatı detayları.....	18
Şekil 3.3. Donatı çeliğinin mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışı..	20
Şekil 3.4. Nükleer santral yapısının üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	21
Şekil 3.5. Abaqus programında parça oluşturma.....	22
Şekil 3.6. Abaqus programında malzeme tanımlama .....	23
Şekil 3.7. Abaqus programında malzeme atama.....	23
Şekil 3.8. Abaqus programında montaj oluşturma.....	24
Şekil 3.9. Abaqus programında ağ oluşturma.....	24
Şekil 3.10. Abaqus programında yapı yükleri ve sınır şartlarının tanımlanması.....	25
Şekil 3.11. Abaqus programında analiz adımları ve analiz türlerinin belirlenmesi.....	25
Şekil 3.12. Abaqus programında çıktı parametrelerinin ayarlanması.....	26
Şekil 3.13. Üç boyutlu sonlu eleman modelinde sınır koşulları.....	26
Şekil 3.14. Rastgele titreşim analizinde frekans adımının tanımlanması.....	27
Şekil 3.15. Rastgele titreşim analizinde rastgele tepki adımının tanımlanması.....	28
Şekil 3.16. Rastgele titreşim analizinde yük tanımı.....	28
Şekil 3.17. Rastgele titreşim analizinde U1 yönünde tanımlanan yer hareketi ivmesi..	28
Şekil 3.18. Dinamik analizde analiz türü ve analiz süresinin belirlenmesi.....	29
Şekil 3.19. Dinamik analizde yük tanımı.....	29
Şekil 3.20. Dinamik analizde yük tanımı.....	30
Şekil 3.21. Nükleer santral binasının mod şekilleri.....	31
Şekil 4.1 Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	36
Şekil 4.2. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin .....	39

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.3. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	40
Şekil 4.4. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model.....	41
Şekil 4.5. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model .....	42
Şekil 4.6. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (ILA027E-sert zemin).....	43
Şekil 4.7. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model.....	44
Şekil 4.8. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model.....	45
Şekil 4.9. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (HWA033N-orta sınıflı zemin).....	46
Şekil 4.10. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model.....	47
Şekil 4.11. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model.....	47
Şekil 4.12. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (TAP051W-yumuşak zemin).....	47
Şekil 4.13. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan max gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	48
Şekil 4.14. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan max gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	49
Şekil 4.15. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler.....	54
Şekil 4.16. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri.....	55
Şekil 4.17. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	58
Şekil 4.18. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak.....	59
Şekil 4.19. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	60

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.20. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan mak. gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	61
Şekil 4.21. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	62
Şekil 4.22. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	66
Şekil 4.23. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri.....	67
Şekil 4.24. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	69
Şekil 4.25. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	70
Şekil 4.26. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	71
Şekil 4.27. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin..	72
Şekil 4.28. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.	73
Şekil 4.29. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler .....	76
Şekil 4.30. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri.....	77
Şekil 4.31. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	80
Şekil 4.32. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	81
Şekil 4.33. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	82
Şekil 4.34. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	83

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.35. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	84
Şekil 4.36. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler.....	88
Şekil 4.37. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri.....	89
Şekil 4.38. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	92
Şekil 4.39. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin .....	93
Şekil 4.40. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yerdeğiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin.....	94
Şekil 4.41. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	95
Şekil 4.42. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin...	98
Şekil 4.43. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum gerilmeler.....	100
Şekil 4.44. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri.....	101
Şekil 4.45. Kobe depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman kayıtları.....	104
Şekil 4.46. Kocaeli depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman kayıtları .....	106

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$E(x)$	Rastgele değişkenin ortalama değeri
$G_x(f)$	Bir sinyalin güç spektral yoğunluğu
$m^2/s^3$	Güç spektral yoğunluk fonksiyon birimi
$m/s$	Hız
$m$	Metre
$M_w$	Deprem Büyüklüğü
<b>PSD S11</b>	Güç spektral yoğunluk fonksiyonu biriminden gerilme
<b>PSD U1</b>	GSYF biriminden yer değiştirme
<b>RMS RS11</b>	Gerilmenin karesinin ortalamasının karekökü
<b>RMS RU1</b>	Yer değiştirmenin karesinin ortalamasının karekökü
<b>RMS RV1</b>	Hızın karesinin ortalamasının karekökü
$R_x(\tau)$	Rastgele değişkenin otokorelasyonu
$R_{x_1x_2}(\tau)$	Çapraz korelasyon fonksiyonu
<b>S</b>	Gerilme
<b>S<sub>0</sub></b>	Ana kaya genlik ivme katsayısı
<b>U</b>	Yer değiştirme
$x(t)$	Rastgele değişken
$\sigma^2(x)$	Rastgele değişkenin varyansı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>FEBG</b>	Filtre edilmiş beyaz gürültü
<b>PGA</b>	Maksimum yer ivmesi
<b>GSYF</b>	Güç spektral yoğunluk fonksiyonu
<b>KOK</b>	Karesel ortalamaların karekökü

## 1. GİRİŞ

Nükleer santral binaları da dâhil olmak üzere kritik yapıların sismik analizi için, bilim insanları tarafından çeşitli analiz metotları araştırılmaya devam edilmektedir. Yapı güvenirliliği konusundaki endişeler arttıkça deprem, rüzgâr ve hareketli yükler gibi dinamik yüklerin rastgele olduğu gerçeği göz önüne alındığında, yapıların deprem etkilerine karşı direncini değerlendirmek ve riskleri en aza indirmek için çeşitli analiz tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, rastgele titreşim analizi ve deterministik analiz gibi çeşitli analiz metotları kullanılmaktadır (Soyluk, 1997). Bu yöntemlerin amacı, yapıların deprem hareketine maruz kaldıklarında yapı davranışını anlamak ve gelecekte meydana gelebilecek depremlere daha hazırlıklı olmaktır.

Deterministik yöntemlerde, literatürde mevcut olan birçok analitik veya sayısal teknik ile yapısal tepkiler zaman alanında hesaplanır ve deprem yer hareketini temsil etmek için deprem ivme kayıtları ele alınır. Ancak, sadece geçmişte belirli bir bölgede meydana gelen bir depreme bağlı olarak bir yapı sisteminin tasarımı kesinlikle yeterli değildir, çünkü o bölgedeki gelecekteki deprem yer ivmesi tamamen farklı özelliklere sahip olabilir. Bununla birlikte, gelecekteki depremlerin yer ivmeleri hakkında her zaman belirsizlikler bulunmaktadır (Soyluk, 1997).

Tamamen olasılıksal yaklaşımlardan biri olan rastgele titreşim analizi teorisinde ise, deprem yer hareketleri tamamen rastgele olarak modellenir ve sistem tepkileri rastgele titreşim problemi olarak ele alınır. Son zamanlarda bu yöntemle çalışmalar yapılmış olsa da, rastgele titreşim analizi yöntemi nükleer santral binalarının analizinde yeterince ele alınmadığı görülmektedir (Yousafzai ve Ahmadi,1982).

Literatürde, nükleer santral yapıları ile ilgili dinamik analiz metodu kullanılarak yapılmış olan çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, nükleer santral yapılarının sismik yükler altında rastgele titreşim analizleri yeterince incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında, Çin'de yaygın olarak kullanılan tipik bir nükleer santral yapısının çeşitli deprem yükleri altında analiz sonuçları, deterministik ve rastgele titreşim analiz yöntemleri uygulanarak, karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

Nükleer enerji santral yapılarının analiz ve projelendirilme aşamalarında, deterministik dinamik analiz yöntemleri özellikle 1960-1970 yılları arasında yaygın hale gelmiştir (Yousafzai ve Ahmadi,1982). Bu yöntemin temeli, gelecekte oluşacak rastgele yük fonksiyonunun aynı şekilde tekrarlanmasına dayanmaktadır. Ancak gerçekte deprem, rüzgâr, kar ve sel yükleri gibi dinamik yükler genellikle rastgele niteliktedir. Sismik yer hareketlerinin rastgele nitelikte olması ve gelecekte olası meydana gelebilecek deprem yüklerinin belirsizlikler içermesinden kaynaklı, yapıların analizinde kullanılan deterministik analiz teorisinin doğru ve güvenilir sonuçlar vermesi kuşkuludur. Dolayısıyla, dinamik bir analiz gelecekte olması muhtemel dinamik yüklerdeki belirsizlikleri de hesaba katmalıdır (Soyluk,1997).

Son yıllarda, deterministik dinamik analiz yöntemlerine alternatif olarak stokastik analiz (rastgele titreşim analizi) yöntemi önerilmektedir. Bu yaklaşım, deprem yer hareketinin rastgele olacak şekilde modellenmesini içermektedir. Yapıların rastgele titreşimlere karşı tepkisini analiz etmeyi amaçlayan bu yaklaşım, yapı güvenirliliğini arttırmayı hedeflemektedir. Rastgele titreşim analizi, deprem, rüzgar, kar vb. gibi dış dinamik yüklere maruz kalan santral yapılarının dayanıklılığını ve güvenliğini değerlendirmek ve artırmak için önemli bir yöntemdir. Sonuç olarak, sistem davranışını daha iyi anlamak, gerçekçi ve daha objektif sonuçlar elde etmek için deterministik dinamik analizin yanı sıra rastgele titreşim analizinin de uygulanması yapılar için önemlidir.

Rastgele titreşim analizi ile birlikte deprem yer ivmesinin çeşitli modelleri önerilmiştir. Housner ve Bycroft'un beyaz gürültü gösterimi, Rosenblueth ve diğerlerinin sonlu süreli beyaz gürültü modeli, Kanai ve Tajimi'nin filtrelenmiş beyaz gürültü gösterimi ve Amin ve Ang'ın ve diğerlerinin durağan olmayan modelleri en iyi bilinen modeller arasında bulunmaktadır (Yousafzai ve Ahmadi,1982). Bu çalışmada, çeşitli deprem kayıtlarından yararlanılarak filtre edilmiş beyaz gürültü modelini esas alan yer hareketi modelleri kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında Çin'de benimsenen tipik bir nükleer santral yapısına rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz yöntemleri uygulanarak, çeşitli deprem yükleri altında ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, rastgele titreşim analizi ile deterministik dinamik analizin

yer değiştirme ve gerilme, zemin cinsi ve fay uzaklığı parametreleri esas alınarak kıyaslanmasını kapsamaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde tezin kapsamına, çalışmada uygulanan analiz çeşitlerine, söz konusu analizlerin nükleer santral yapıları için neden önemli olduğuna yer verilmiştir. İkinci blmde literatürde nükleer santral yapılarının rastgele titreşim analizi ve yakın fay etkileri ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. nc blmde çalışmada kullanılan rastgele titreşim analizi, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli, deterministik dinamik analiz yöntemlerinden, ele alınan nükleer santral yapısının nümerik modelinden, malzeme özelliklerinden bahsedilmiş ve analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının bilgilerine yer verilmiştir. Dördüncü blmde, her bir deprem kaydı; zemin cinsi, rastgele titreşim analizi (filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ve gerçek deprem yer hareketi), deterministik dinamik analiz ve fay uzaklığı başlıkları altında değerlendirilmiş olup, bu analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Son blmde ise elde edilen analiz sonuçları her bir deprem kaydı için kendi arasında karşılaştırmalı olarak yorumlanmiş ve daha sonra tüm deprem kayıtları göz önüne alınarak uzak ve yakın fay etkisi için bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç kısmında, çalışmadan elde edilen bulgulara yer verilmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde nükleer santral yapılarının rastgele titreşim analizi üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır; ancak rastgele titreşim analizleri için filtre edilmiş beyaz gürültü (FEBG) modelini kullanan ve bu analizlerin sonuçlarını deterministik dinamik analizle karşılaştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu tez çalışmasının ileride yapılabilecek diğer çalışmalara yol göstermesi beklenmektedir. Nükleer santral yapılarının rastgele titreşim analizini içeren çalışmalar aşağıda verilmiştir.

### 2.1. Nükleer Santral Yapılarının Rastgele Titreşim Analizi İle İlgili Çalışmalar

Literatürde, Clough ve Penzien (1975) ile Ahmadi (1979) tarafından deprem yer hareketinin çeşitli stokastik modelleri önerilmiştir. Housner (1955) ve Bycroft'un (1960) beyaz gürültü gösterimi, Rosenblueth ve diğerlerinin (1960) sonlu süreli beyaz gürültü modeli, Kanai'nin (1957) ve Tajimi'nin (1960) filtrelenmiş beyaz gürültü modeli, ve Amin ve Ang'ın (1968) durağan olmayan modelleri stokastik modeller arasındadır (Yousafzai & Ahmadi, 1982). Bu tez çalışmasında, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak, çeşitli deprem yer hareketleri rastgele olarak modellenmiştir.

Yousafzai ve Ahmadi (1982) çalışmalarında, bir nükleer santral yapısının deprem hareketine tepkisi ele alınmıştır. SAP IV yapısal analiz programı kullanılarak yapının sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve yapının frekansları ve ilgili mod şekilleri belirlenmiştir. Dış katmanın depremlere tepkisi analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçları tartışılmıştır. Ardından deprem yer ivmesinin stokastik modelleri ele alınmış, güç spektrumu ve karelerinin ortalamasının karekökü için genel ifadeler türetilmiştir. Rastgele titreşim hareketine maruz kalan yapının yer değiştirme tepkilerinin karesel ortalamalarının karekök (KOK) değerleri değerlendirilmiştir. Yapının maksimum yer değiştirme tepkileri, stokastik ve deterministik analizlerinden elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar gözlenmiştir (Yousafzai ve Ahmadi, 1982).

Ghiocel (2009), rastgele titreşim analizinin sismik zemin-yapı etkileşim tepkileri üzerindeki etkilerini, kütle eksantrisitesi olmayan tipik bir nükleer santral binası ve kaya zemin üzerine kurulmuş kütle eksantrisitelere sahip bir nükleer santral binası için incelemiştir (Ghiocel, 2009).

Medel-Vera ve Ji (2016), çalışmalarında basınçlı bir su reaktör yapısı ele alarak bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşım, analiz edilen enerji santralının yapısal modelinin nonlineer dinamik analizini uygulamak için deprem hareketlerinin stokastik simülasyonuna dayanmaktadır. Çalışmada dezavantaj olarak, çok fazla sayıda nonlineer dinamik analiz yapılması gerektiğinden teknolojik kaynakların uzun süre kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada uygulanan yaklaşımlar arasında risk değerlendirmeleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Medel-Vera ve Ji, 2016).

Ghiocel ve diğerleri (2017) yer hareketi değişimini tanımlayan ana etkileri dikkate alarak, bu etkilerin zemin-yapı etkileşimi ve yapı-zemin-yapı etkileşim tepkileri üzerindeki etkileri ile ilgili bir inceleme yapmıştır (Ghiocel ve diğerleri, 2017).

Zin ve ekibi (2017), bir nükleer santral binasının senaryo depremi altındaki tepkilerini olasılık analizine dayalı yöntemlerle incelemiştir. Abrahamson tarafından geliştirilen bir uygunluk fonksiyonu, yer hareketindeki değişimini modellemek için kullanılmıştır. Yer hareketi değişiminin ve model parametre belirsizliğinin etkisi, yer hareketi değişiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için hesaplanan tepki spektrumları karşılaştırılarak belirlenmiştir. SASSI2020 yazılımı kullanılarak makul yapı içi tepki spektrumları elde edilmiştir (Zin ve diğerleri, 2017).

Zhou ve arkadaşları (2018), nükleer enerji santrallerinde inşaa edilen düşey istinat duvarlarına yönelik bir araştırma yapmışlardır. Günümüzde nükleer enerji santrallerinin drenaj yapılarını korumak amacıyla ve aynı zamanda pompa istasyon havuzu girişlerine yapılan düşey istinat duvarları yaygın bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Sismik kuvvetlerin belirsiz niteliklere sahip olduğunu belirten araştırmacılar, nükleer santral yapısının güvenlik tasarım gerekliliklerine göre düşey istinat duvarlarının depreme karşı davranışını araştırmanın büyük önem arz ettiğini düşünmüşlerdir. Nükleer güç santralinde inşaa edilen pompa havuzunun iç kısmında yer alan düşey destek duvarının, rastgele sismik tepkisini değerlendirmek amacıyla çalışmalar yürütmüşlerdir. İlk olarak, nükleer güç santralının proje tasarımı için deprem spektrumuna göre spektral rastgele fonksiyon yöntemi ile stasyonier olmayan deprem yer hareketlerinin bir dizi temsili ivme zaman geçmişi oluşturulmuştur. Daha sonra, düşey istinat duvarının deterministik ve stokastik sismik tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düşey istinat duvarlarının stokastik tepkilerini ve sismik güvenilirliğini araştırmak için önerilen yöntemin deprem olayları sırasında sismik

güvenliği değerlendirmek için daha objektif sonuçlar verebileceğini göstermektedir (Zhou ve diğerleri, 2018).

Nükleer santraldeki bölmeler arasında bariyer oluşturarak radyoaktif materyallerin sızmasını engellemeye yardımcı olan düşey duvarlar, nükleer santral yapısının güvenliğini ve bütünlüğünü korumak için önemli bir unsurdur. Zhou ve arkadaşları (2021), nükleer bir enerji santraline ait düşey duvarın deprem etkisinde deformasyonunu elde etmek için stokastik deprem yüklemesi yapmıştır. Deprem yer hareketlerinin büyük belirsizlik taşıdığını da belirten Zhou ve arkadaşları, bu belirsizliği yapıya yansıtmak için spektral rastgele fonksiyon yöntemiyle yapıya tamamen stasyonel stokastik deprem yüklemesi yapmışlardır. Çalışmanın devamında stokastik deprem yüklemesinin yapıda oluşturduğu etkiyi gözlemlemişlerdir (Zhou ve diğerleri, 2021).

Başka bir çalışmada, rastgele deprem ivmelerinin etkilerini dikkate alarak, rijit bir temele sahip nükleer bir santraldeki deprem tepkileri, rastgele titreşim teorisi ile belirlenmiştir. Deprem hareketine maruz kalan sistemin rastgele tepkisi rastgele titreşim analizi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Temelin yapı tepkileri dikkate alınarak ve deprem dalga fonksiyonları kullanılarak güç spektral yoğunluk (GSY) fonksiyonu elde edilmiştir. Rastgele titreşim analizi sonucu yapıda oluşan tepkilerin maksimum değerleri ile yapının tepki spektrumu tahmin edilmiştir (Lee, 2023).

Depremlerin bir dizi sarsıntı özeliği taşıdığını (ana ve ardışık sarsıntı gibi) ve bu sarsıntıların rastgele özelliklere sahip olduğunu düşünen Pang ve arkadaşları (2023), ana sarsıntıların yapılara zarar verebileceğini, ancak art arda gelen depremlerin(ardışık sarsıntılar) daha da fazla hasara yol açabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, AP1000 tipi nükleer bir enerji santralinin rastgele dinamik tepkisini elde etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. İlk olarak stokastik fonksiyon modeli ile ana sarsıntı ve ardışık sarsıntı dizileri oluşturulmuştur. Sonrasında nükleer santral üzerindeki yer değiştirme, gerilme, hasar oranı gibi parametreler üzerinden ardışık sarsıntının etkileri gösterilmiştir. Sonuçlar, ardışık sarsıntılardan elde edilen tepkilerin, tek bir ana sarsıntının dinamik tepkisinden daha büyük olduğunu ve bunun sonucunda nükleer enerji santraline daha fazla zarar verebildiğini göstermiştir. Maksimum yer ivmesi (PGA) arttıkça, nükleer santral tepkisinin daha rastgele hale geldiği de vurgulanmıştır. Ayrıca, ardışık deprem sarsıntılarının nükleer enerji santralinin güvenilirliğini de azalttığı belirlenmiştir (Pang ve diğerleri, 2023).

## 2.2. Nükleer Santral Yapılarının Yakın Fay Analizi İle İlgili Çalışmalar

Bugüne kadar faya yakın yer hareketleri altında yapısal sistemlerin sismik tepkilerini belirlemek için birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, faya yakın yer hareketleri altında nükleer santral yapılarının sismik tepkilerini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Galal ve Ghobarah (2006) Kuzey Amerika'daki nükleer tesislerin tasarımında faya yakın yer hareketlerinin etkisini araştırmışlardır. Mevcut çalışmanın amacı, Kuzey Amerika kodlarına göre tasarlanmış nükleer santral yapıları üzerindeki yakın-fay depremlerinin güvenlik etkilerini değerlendirmektir. Seçilen deprem kayıtlarının ABD ve Kanada tasarım spektrumlarıyla spektral karşılaştırması yapılmıştır. Araştırmadan, nükleer santral yapılarının tasarım spektrumları, yakın fay depremlerinin etkilerini daha doğru bir şekilde hesaba katmak amacıyla revize edilmesi gerektiğini ve bu güncellemenin, nükleer santral yapılarının yakın faylardan kaynaklanabilecek yer hareketlerine karşı daha etkili bir şekilde korunmasını sağlayarak yapısal güvenliği artırabileceğini belirtmişlerdir (Galal ve Ghobarah, 2006).

Choi ve diğerleri (2010), yakın fay depremleri için doğrusal olmayan sismik analiz gerçekleştirerek bir nükleer santral yapısının (CANDU) sismik riskini tahmin etmiştir. Nükleer santral yapısının analizinde, doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır. Öngermeli betondan inşaa edilmiş nükleer santral yapısının sismik tepkilerini incelemek için 30 adet yakın fay deprem kaydı kullanılmıştır. Yakın fay yer hareketleri için nükleer santral yapısının sismik riski değerlendirilmiş ve yakın fay yer hareketlerinin nükleer santral yapılarının yapısal güvenliğinde önemi vurgulanmıştır (Choi ve diğerleri, 2010).

Longjun ve diğerleri (2010), nükleer santrallerin sismik tasarımı için Çin kodlarına göre tasarlanan nükleer santral yapıları üzerindeki yakın fay etkisini değerlendirmiştir. Mevcut çalışma, Çin koduna göre tasarlanmış nükleer santral tesislerinde yakın-fay etkisinin güvenlik etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen kayıtların Çin ve diğer kod tasarım spektrumlarıyla spektral karşılaştırması yapılmıştır. Tasarım spektrumlarının, hem deprem büyüklüğünden hem de yakın fay mesafesinden önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ve Ortak Araştırma Merkezi, 2002-2005 yılları arasında ortaklaşa bir araştırma projesi yürüterek, proje kapsamında nükleer enerji santrallerinde

düşük-orta büyüklükteki yakın fay deprem hareketlerinin güvenlik önemini incelemiştir. Çalışmada nükleer enerji santrallerinde beklenmedik zararları ortaya çıkarabilecek parametreler üzerinde durulmuştur. Araştırmalarda, yakın faydan ziyade, deprem hareketinin frekans içeriğinin daha önemli olduğu belirtilmiştir. Bu bulguların, nükleer santrallerde sismik etkilerin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine katkıda bulunarak sektörün gelişimine yardımcı olacağı düşünülmektedir (Labbe ve Altinyollar, 2011).

Mena (2016) yakın fay deprem hareketlerine maruz kaldığında, zemin yapı etkileşimini dikkate alan bir nükleer enerji tesisinin tepkisini modellemek için bir yaklaşım önermiştir. Yakın fay kaynaklı deprem hareketleri, belirli bir sismik ortam için en büyük depremleri üretmese bile, bu yakın kaynaklardan gelen deprem hareketlerinin şiddeti, nükleer santrallerin yapısal ve yapısal olmayan tasarımını bazı frekans aralıklarında etkileyebildiğini belirtmiştir (Mena, 2016).

Jin ve Gong (2020), faya yakın yer hareketlerine maruz kalan bir nükleer santral yapısının sismik kapasite ve kırılma analizini hasar performansına dayalı bir perspektiften sunmuştur. Yer hareketleriyle ilişkili belirsizlikleri yakalamak için, dinamik analiz tekniği uygulanmış ve beton hasarlı plastisite modelinde, hasar faktörüne dayalı olarak üç hasar seviyesi önerilmiştir. MATLAB programı ile nükleer santral yapısının hafif hasar, orta düzey hasar ve ciddi hasar altında kırılma eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, santral yapısının tabanından 8 m içerisindeki bölgelerin, en hassas noktalar olduğunu ortaya koymuştur (Jin ve Gong, 2020).

Soyluk ve diğerleri (2022, 2023), nükleer santral yapılarının doğrusal olmayan dinamik analizini darbe ve sıçrama özellikleri gösteren kaydedilmiş yakın fay depremleri altında gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ele alınan nükleer santral binası, bir küresel kubbe ile bağlantılı silindirik duvara sahiptir. Yakın fay depremleri için elde edilen yapısal tepkiler, uzak fay yer hareketlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Nükleer santraller üzerinde özellikle yakın-fay yer hareketlerinin darbe tipi karakteristiklerinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak, özellikle yakın fay yer hareketlerinin darbe karakteristiklerinin, ele alınan nükleer santral binasının yapısal tepkileri üzerinde belirgin etkileri olduğu belirlenmiştir (Soyluk ve diğerleri, 2022, 2023).



### **3. ARAŞTIRMA BULGULARI**

#### **3.1. Materyal ve Method**

Bu bölümde öncelikle tez çalışmasının ana konusu olan rastgele titreşim teorisi üzerinde durulmuş, yer hareketinin rastgele titreşim analizinde nasıl tanımlanacağı açıklanmıştır. Bunun yanında karşılaştırma amacı ile kullanılan deterministik dinamik analiz yönteminden de kısaca bahsedilmiştir. Çalışmada dikkate alınan nükleer santral yapısının sonlu eleman modeli ve söz konusu santral binasının ABAQUS programı ile dinamik analizinin nasıl yapıldığı da bu bölümde verilmiştir. Bölüm sonunda modal analiz ile bulunan nükleer santral binasının frekans ve mod şekilleri verildikten sonra, çalışmada kullanılacak olan ChiChi, Kobe ve Kocaeli depremlerine ait özellikler tanımlanmıştır.

##### **3.1.1. Rastgele titreşim analizi**

Rastgele titreşim analizi, belirli değişkenlerin belirsizliğini ve rastgele doğasını dikkate alan ve yapıların rastgele titreşimlerinin incelenmesi için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, belirsizlikleri ve olasılıkları hesaba katarak yapıya etki eden rastgele yüklerin, olasılıksal dağılımlarını inceler.

Nükleer santral tasarımlarında deterministik analiz yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Deterministik analiz, belirli ve kesin parametreleri kullanarak yapılan analizdir ve belirsizlikleri veya rastgele değişkenleri dikkate almamaktadır. Bu nedenle, tasarımların birçoğu, daha basit ve hızlı bir şekilde yapılabilen deterministik analizlerle gerçekleştirilmektedir. Rastgele titreşim analizi ise belirsizlikleri ve rastgele değişkenleri hesaba katarak yapılan bir analiz yöntemidir. Bu analiz, nükleer santral yapılarının belirli bir süre içinde maruz kalabileceği rastgele yüklerin etkilerini değerlendirerek riskleri azaltmaya yönelik tasarım kararları alınmasına yardımcı olabilir. Ancak, rastgele titreşim analizi genellikle daha karmaşık, hesaplama açısından yoğun ve detaylı bir analiz gerektirir. Teorik olarak rastgele titreşim analizi, belirsizlikleri ve rastgele değişkenleri hesaba kattığından deterministik analizden daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar sağlayabilir. Bununla birlikte, pratik uygulamada, rastgele titreşim analizinin daha karmaşık yapısı ve hesaplama zorlukları nedeniyle daha az kullanıldığı görülmektedir.

Çalışmada yer hareketi modeli olarak gerek gerçek yer hareketini gerekse de FEBG modeli için oluşturulan güç spektral yoğunluk fonksiyonları dikkate alınarak rastgele titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.

ChiChi, Kobe ve Kocaeli deprem hareketleri etkisindeki nükleer santral yapısı, rastgele titreşim analizi dikkate alınarak incelenecektir. Rastgele titreşim analizinde spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilen rastgele tepkiler, yapısal tepkileri belirlemek için kullanılmaktadır. Aşağıda rastgele titreşim teorisinde kullanılan terimler (güç spektral yoğunluk fonksiyonları, varyans ve karesel ortalama karekök vb.) genel formülasyonlarla ifade edilmiştir (ABAQUS Inc,2006).

Bir rastgele değişken  $x(t)$ , rastgele değişkenin ortalama değeri ise  $E(x)$  olarak ifade edilir,

$$E(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (3.1)$$

dinamik tepkinin ortalama değeri her zaman sıfır olacağından,  $E(x) = 0$  değerine eşittir. Rastgele bir değişkenin varyansı, değişkenin değeri ile ortalaması arasındaki kareler farkının ortalama değerini ölçer,

$$\sigma^2(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (x(t) - E(x))^2 dt \quad (3.2)$$

$E(x) = 0$  olduğundan Eş. 3.2'den varyansın, ortalama değerinin karesi ile aynı olduğu anlaşılır.

$$E(x)^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt \quad (3.3)$$

ABAQUS programında değişkenler, karesel ortalamalarının karekök (KOK) değerleri olarak verilir.

$$\sigma(x) = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.4)$$

Çapraz-korelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)x_2(t + T) dt \quad (3.5)$$

Bir değişkenin otokorelasyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + T) dt \quad (3.6)$$

Bir sinyalin güç spektral yoğunluğu, Eş. 3.6 kullanılarak otokorelasyonun Fourier dönüşümü aracılığıyla tanımlanır, burada  $G_x(f)$  frekans aralığındaki sinyal gücünü temsil eder.

$$G_x(f) = 2F[R_x(\tau)] = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (3.7)$$

Burada ters ilişki kurulursa,

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2} F^{-1}[G_x(f)] = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} G_x(f) e^{-2\pi i f \tau} df \quad \text{elde edilir.} \quad (3.8)$$

$G_x(f)$  aşağıdaki gibi de yazılabilir,

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau \quad (3.9)$$

Karelerin ortalamasının karekök (KOK) değeri, güç spektral yoğunluk fonksiyonunun (GSYF) tüm frekanslar üzerinde integre edilmesiyle elde edilebilir,

$$x_{rms}^2 = R_x(0) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [G_x(f)] df = \int_0^{\infty} [G_x(f)] df \quad (3.10)$$

Belirli bir frekans aralığı için  $x$ 'in karesinin ortalamasını hesaplamak mümkündür,

$$E[x^2](f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} [G_x(f)] df \quad (3.11)$$

Güç spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) için olduğu gibi, iki sinyal için çapraz spektral yoğunluk da aynı şekilde tanımlanır,

$$G_{xy}(f) = 2F[R_{xy}(\tau)] \quad (3.12)$$

İşlem açısından daha uygun olması için açısal frekansı  $\Omega = 2\pi f$  ve güç spektral yoğunluk fonksiyonunu (GSYF) aşağıdaki gibi tanımlamak mümkündür,

$$S_x(\Omega) = \frac{1}{2\pi} G_x(f) \quad (3.13)$$

Bu nedenle,

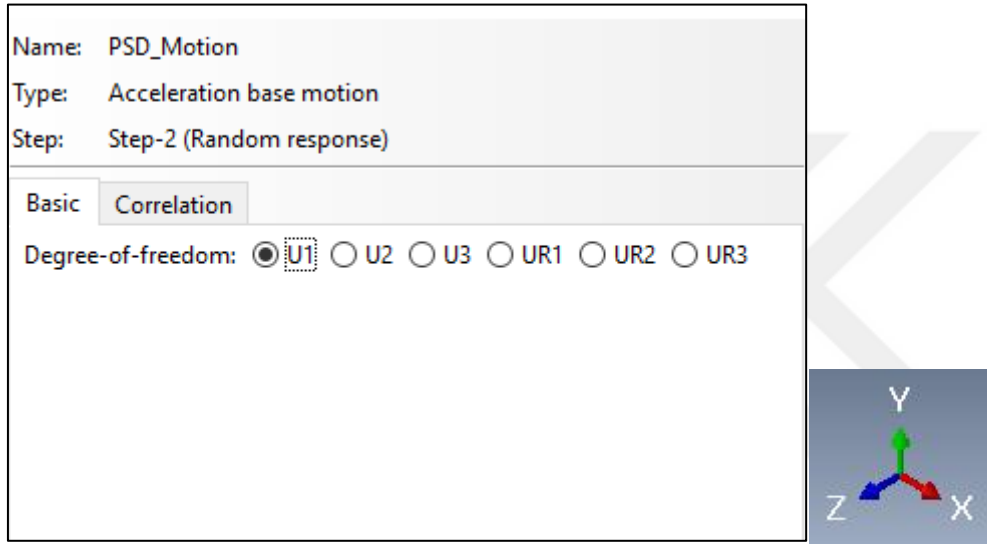
$$S_x = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(\Omega \tau) d\tau \quad \text{ve} \quad x_{rms}^2 = \int_0^{\infty} S_x(\Omega) d\Omega, \quad (3.14)$$

$$S_x = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau \quad \text{denklemleri elde edilir.} \quad (3.15)$$

Karelerin ortalamasının karekök (KOK) değeri, değişkenin kendisiyle aynı birimlere sahip olduğu için varyansın yerine kullanılır. ABAQUS, değişkenin tek taraflı güç spektral yoğunluğunu frekans aralığı üzerinde entegre ederek karelerin ortalamasının karekök değerini hesaplar.

$$\sigma(x) = \sqrt{R(0)} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_x(f) df} \quad (3.16)$$

Abaqus programında rastgele titreşim analizini tanımlamak için analiz türünün ve gerekli parametrelerin programda girilmesi gerekmektedir. Programda rastgele titreşim analizinin tanımlanmasına bölüm 3.4.2’ de detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Analiz türü ve diğer parametreler tanımlandıktan sonra yapıda 1 doğrultusunu temsil eden, yatay doğrultuda X yönünde deprem ivme yer hareketleri tanımlanmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Deprem ivme yer hareketi tanımlanması

#### Filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modelleri

Bu çalışmada, deprem yer hareketi modeli olarak FEBG modelini dikkate alan rastgele titreşim teorisinin analiz yaklaşımı ele alınmıştır. Bu model, deprem kaynaklı yer hareketini temsil etmek için kullanılan bir matematiksel yaklaşımdır. Beyaz gürültü yer hareketi sinyalini belirli bir frekans aralığına filtreleyen bu beyaz gürültü yer hareketi modeli, gerçekçi deprem etkilerini simüle etmektedir. Rastgele titreşim analizinde deprem hareketi, spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilmiş ve FEBG yer hareketi modelini dikkate alan rastgele titreşim teorisi kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir.

Deprem sürecini karakterize eden yer ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun (GSYF) Clough ve Penzien tarafından önerilen aşağıdaki formda olduğu varsayılır (Clough ve Penzien ,1993).

$$S_{\ddot{v}_g}(w) = S_0 |H_g(w)|^2 |H_f(w)|^2 \quad (3.17)$$

$$|H_g(w)|^2 = \frac{w_g^4 + 4\xi_g^2 w_g^2 w^2}{(w_g^2 - w^2)^2 + 4\xi_g^2 w_g^2 w^2} \quad (3.18)$$

$$|H_f(w)|^2 = \frac{w^4}{(w_f^2 - w^2)^2 + 4\xi_f^2 w_f^2 w^2} \quad (3.19)$$

Eş.3.18 ve Eş.3.19 sırasıyla ilk ve ikinci filtrelerin frekans tepki fonksiyonlarıdır. Bu eşitlikler zemin ortamının dinamik özelliklerini,  $S_0$  beyaz gürültü ana kaya ivmesinin genliğini,  $w_g$  ve  $\xi_g$  birinci filtre için rezonans frekansı ve sönüm oranını,  $w_f$  ve  $\xi_f$  ise ikinci filtre için rezonans frekansı ve sönüm oranını temsil eder. Bu çalışmada, homojen sert, orta ve yumuşak zemin tipleri kullanılmış olup, bu zemin tipleri için filtre parametreleri Der Kiureghian ve Neuenhofer tarafından önerilmiş ve Çizelge 3.1' de gösterildiği şekilde kullanılmıştır (Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991).

Çizelge 3.1. Model zemin türleri için güç spektral yoğunluk parametreleri (Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991)

Zemin tipi	$w_g$ (rad/s)	$\xi_g$	$w_f$ (rad/s)	$\xi_f$
Sert	15,0	0,6	1,5	0,6
Orta	10,0	0,4	1,0	0,6
Yumuşak	5,0	0,2	0,5	0,6

$S_0$  katsayısını hesaplamak için Fortran dilinde programlanmış ve yapıların stokastik analizi için genel amaçlı bir bilgisayar programı olan STOCAL'den faydalanılmıştır. Programın çalışma prensibi hem gerçek hem de FEBG modeli için güç spektral yoğunluk fonksiyonunun varyansını hesaplamaya dayanmaktadır.

$S_0$  değeri,

$$S_0 = \frac{\sigma^2_{\ddot{u}_g}}{\int_0^\infty H_g(w)^2 H_f(w)^2 dw} = \frac{\sigma^2_{\ddot{u}_g}}{\Phi} \quad (3.20)$$

ifadesi ile elde edilebilmektedir. Eş. 3.20’de belirtilen  $\sigma^2_{\ddot{u}_g}$  ifadesi gerçek yer hareketi ivmesinin varyansını temsil eder.  $\Phi$  değeri ise filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin varyansıdır (Datta ve Allam,1986). Frekansa karşılık GSY değerleri oluşturulduktan sonra, varyans değerlerini hesaplayabilmek için STOCAL programı kullanılmaktadır.

Gerçek depremin yer hareketi ivmesinin varyansı ile FEBG modelinden elde edilen varyans katsayıları birbirine bölünerek  $S_0$  katsayısı her bir deprem kaydı için ayrı ayrı elde edilmektedir.

Çalışmada ilk olarak ChiChi deprem ivmesi için  $S_0$  katsayısı belirlenmiştir.  $S_0$ , yer ivmesinin varyansı 1999, ChiChi Tayvan deprem ivmesinin varyansına eşitlenerek her bir zemin türü için elde edilmiştir. Her bir zemin türü için hesaplanan yoğunluk parametresi değerleri:  $S_0(\text{sert}) = 4,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,  $S_0(\text{orta}) = 1,28 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,  $S_0(\text{yumuşak}) = 9,33 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$

Daha sonra aynı işlem Kobe ve Kocaeli depremleri için tekrarlanmıştır. Burada yakın ve uzak fay etkisi de değerlendirileceğinden dolayı her iki depremin  $S_0$  katsayıları, uzak ve yakın fay deprem kayıtları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kobe ve Kocaeli deprem ivmeleri için  $S_0$  katsayısı yine aynı şekilde STOCAL programı ile belirlenmiştir.  $S_0$ , yer ivmesinin varyansı Kobe ve Kocaeli deprem ivmelerinin varyansına eşitlenerek her bir zemin türü için elde edilmiştir. Hesaplanan yoğunluk parametre değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kobe ve Kocaeli depremleri için  $S_0$  katsayısı değerleri

Zemin Cinsi	Kobe Depremi $S_0$ Katsayı Değerleri ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )		Kocaeli Depremi $S_0$ Katsayı Değerleri ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )	
	Uzak Fay	Yakın Fay	Uzak Fay	Yakın Fay
Sert	$4,0843 \times 10^{-5}$	$1,136 \times 10^{-3}$	$1,243 \times 10^{-5}$	$6,679 \times 10^{-4}$
Orta	$6,6067 \times 10^{-5}$	$1,904 \times 10^{-3}$	$2,611 \times 10^{-5}$	$6,0488 \times 10^{-5}$
Yumuşak	$1,935 \times 10^{-3}$	$9,686 \times 10^{-3}$	$1,606 \times 10^{-4}$	$3,573 \times 10^{-3}$

### 3.1.2. Deterministik analiz

Çalışmanın diğer bir aşamasında, nükleer santral yapısı ChiChi, Kobe ve Kocaeli deprem kayıtları kullanılarak deterministik analiz ile incelenecektir. Burada amaç, daha önce uygulanan rastgele titreşim analizi ile deterministik analiz sonuçlarını kıyaslamaktır.

Deprem yer hareketlerine maruz kalan yapıların dinamik tepki analizi yapı sistemlerinin temel gerekliliklerinden biridir. Abaqus programında, deterministik analizi tanımlayabilmek için çalışmaya uygun analiz türlerinin (statik, dinamik vb.), analiz iterasyon adımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Statik ve dinamik analiz özelliklerinden aşağıda bahsedilmiştir.

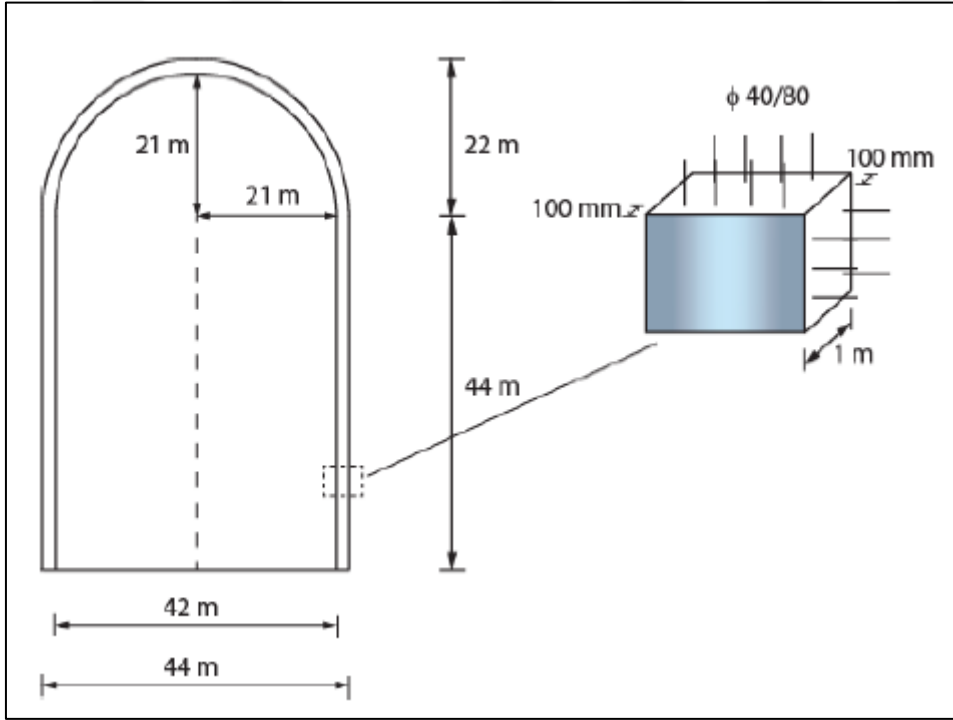
Yapısal dayanıklılığı ve deformasyonları dikkate alan statik analizde, yapı sistemleri sabit (durağan) yükler altında değerlendirilir. Diğer yandan, dinamik analizde yapı üzerinde hareketli ve değişken yükler dikkate alınır. Bu yükler, deprem, rüzgâr veya titreşim gibi dinamik etkilerden kaynaklanabilir. Bu analiz yöntemi, yapı rezonansı, yapının titreşim frekansları ve dinamik tepkileri belirlemek için kullanılır. Çalışmada, nükleer santral yapısı üzerinde dinamik tepkiler incelendiğinden, dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır.

Abaqus programında iki temel analiz metodu vardır. Bunlardan birincisi, Implicit (örtük) yöntem, diğeri ise Explicit (açık) yöntemdir. Implicit yöntem, statik ve düşük hızdaki dinamik olayları kapsarken, diğeri yöntem çarpma, darbe olayları, dalga yayılma analizi ve patlama gibi yüksek hızlı ve kısa süreli dinamik olayların analizini kapsamaktadır. Çalışmada, deprem gibi düşük hızdaki dinamik olaylar incelendiğinden Abaqus programında Implicit metodu kullanılmıştır. Bu metod, Newton-Raphson gibi doğrusal olmayan iterasyon çözücülerini kullanarak denge denklemlerini her bir adım için çözmektedir. Bu yöntem, her iterasyon adımında büyük doğrusal denklemlerinin çözülmesini gerektirir (Abaqus, vs 6.5 ).

Çalışmada ihtiyaç duyulan ivme ve yer değiştirme kayıtları için PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) Berkeley'den faydalanılmıştır. Kaliforniya Üniversitesi'ne bağlı olarak faaliyet gösteren PEER Berkeley, depremlerin yapılar üzerindeki etkilerini anlamak ve değerlendirmek için araştırmalarına devam etmektedir.

### 3.2. Nükleer Santral Binası

Çalışmada nükleer santral binasını modellemek için ABAQUS/CAE 6.11 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada ele alınan nükleer enerji santrali binası, Çin'de yaygın olarak benimsenen tipik bir santral binasıdır. Binanın gövdesi silindirik duvar ve üst kısımda yer alan küresel bir kubbeye sahiptir. Silindirin ve yarı küresel kabuğun yarıçapı 22 m, silindirin yüksekliği 44 m ve yapının toplam yüksekliği ise 66 m'dir (Şekil 3.2) (Lu ve diğerleri 2015). Yapı, iç ve dış yüzeylerde, 80 mm aralıklarla yerleştirilmiş 40 mm çapında çift donatılı 1 m kalınlığında betonla kaplıdır. Pas payı her iki yüzde de 100 mm olarak kabul edilmiştir (Sadique MR ve diğerleri, 2013).



Şekil 3.2 Santral yapısının kesit görünümü ve donatı detayları (Soyluk ve diğerleri, 2023)

### 3.3. Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada, ABAQUS programında beton için beton hasarlı plastisite modeli kullanılmıştır. Söz konusu nükleer santral binası için B50 sınıfı beton kullanılmıştır. Hasar parametresi, şekil değiştirme ve diğer bazı unsurları içeren beton hasar plastisite modelinin parametreleri Çizelge 3.3'de verilmiştir (Esfahani MH ve diğerleri, 2017).

Çizelge 3.3. B50 sınıfı beton için malzeme özellikleri (Esfahani MH ve diğerleri, 2017)

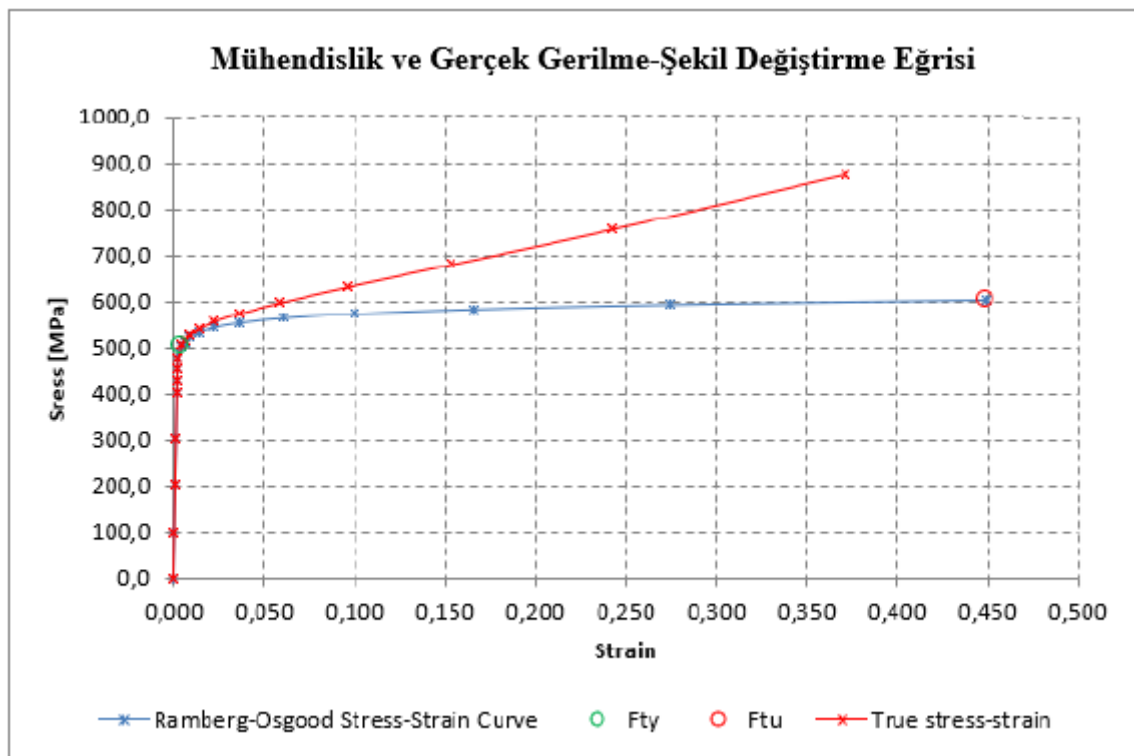
Malzeme Özellikleri	B50	Plastisite parametreleri	
		Dilatasyon açısı	31
Betonun elastisitesi		Eksantriklik	0,1
E (GPa)	33,4 0,2	fb0/fc0	1,16
		K	0,67
		Viskosite	0
Beton basınç davranışı		Beton basınç hasarı	
Akma gerilmesi (MPa)	Elastik olmayan deformasyon	Hasar parametresi	Elastik olmayan deformasyon
25,5	0	0	0
32	5,73819E-06	0	5,73819E-06
37,5	4,13628E-05	0	4,13628E-05
42	0,000106874	0	0,000106874
45,5	0,000202271	0	0,000202271
48	0,000327555	0	0,000327555
49,5	0,000482726	0	0,000482726
50	0,000667782	0	0,000667782
49,5	0,000882726	0,01	0,000882726
48	0,001127555	0,04	0,001127555
45,5	0,001402271	0,09	0,001402271
42	0,001706874	0,16	0,001706874
37,5	0,002041363	0,25	0,002041363
32	0,002405738	0,36	0,002405738
25,5	0,0028	0,49	0,0028
18	0,003224148	0,64	0,003224148
9,5	0,003678183	0,81	0,003678183
Beton çekme davranışı		Beton çekme hasarı	
Akma gerilmesi (MPa)	Çatlama gerinimi	Hasar parametresi	Çatlama gerinimi
5	0	0	0
0,05	0,001494322	0,99	0,001494322

Nükleer santral binası için SA738 B sınıf çelik kullanılmıştır. Donatı çeliğini modellemek için klasik bir elasto-plastik model benimsenmiştir. Donatı çeliği sismik yükleme altında şekil değiştirme-sertleşme davranışı göstereceğinden, donatılar için bilineer kinematik bir sertleşme modeli kullanılmıştır. Bu betonarme nükleer santral binasında kullanılan donatı çeliğinin mekanik özellikleri Çizelge 3.4' de listelenmiştir. Dikkate alınan donatı çeliğinin

mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışı ise Şekil 3.3' de verilmiştir (Soyluk ve Sadegh-Azar, 2020).

Çizelge 3.4. Donatı çeliği için malzeme özellikleri (Soyluk ve Sadegh-Azar, 2020)

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
7850	210	0,3	503,06	603,43



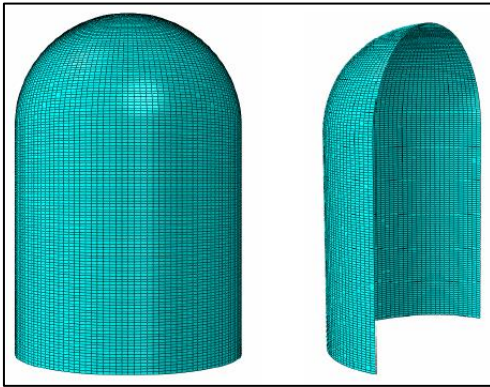
Şekil 3.3. Donatı çeliğinin mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışı (Soyluk ve Sadegh-Azar, 2020)

### 3.4. Nümerik Modelleme

Nümerik incelemeler sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Nükleer santral binasının üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmak için ABAQUS/CAE 6.11 yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, ele alınan nükleer santral binası için kabuk elemanlarından oluşan bir model oluşturulmuştur.

#### 3.4.1. Donatı ve beton katmanını içeren kabuk modeli

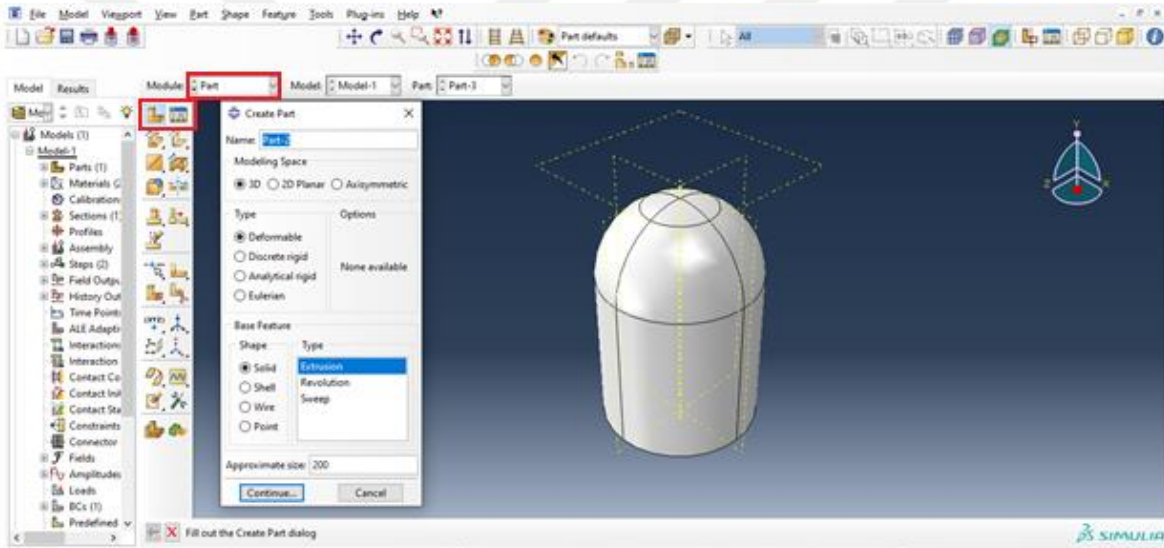
ABAQUS'de, nükleer santral binasını modellemek için katmanlı kabuk elemanları kullanılmıştır. Santral yapısını modellemek için katı elemanların kullanılmasının önemli bir hesaplama süresi gerektirdiği iyi bilinmektedir. Bu nedenle, santral yapısının sonlu eleman modeli, oldukça gerçekçi sonuçlar veren kabuk elemanı ile ağ haline getirilmiştir. Silindir kalınlığı silindir yarıçapının onda birinden az olduğu için silindir, içine donatıların gömülü olduğu kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Yarı eliptik kubbe de kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Donatı katmanları, kubbe ve silindirin 1 m kalınlığındaki beton katmanının iç ve dış yüzlerinde meridyenel ve çevresel yönler boyunca tanımlanmıştır. Şekil 3.4 nükleer santral yapısının üç boyutlu sonlu eleman modelini göstermektedir. Zhai ve diğerleri (2015) çalışmalarında, ağ boyutu olarak 0,5 m x 0,5 m seçmiş ve 20220 adet S4R tipi doğrusal dörtgen kabuk eleman kullanmıştır. Ağ boyutunu arttırmak, analizin doğruluğunu artırabilir ancak aynı zamanda hesaplama süresini de uzatabilir. Bu nedenle, yapı ağının boyutunu belirlerken, doğruluk ve hesaplama süresi arasında denge kurmak önemlidir. Bu sebeplerden dolayı bu tez çalışmasında eleman ağ boyutu 0,5 m x 0,5 m seçilmiş ve S4R eleman tipi kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Nükleer santral yapısının üç boyutlu sonlu eleman modeli

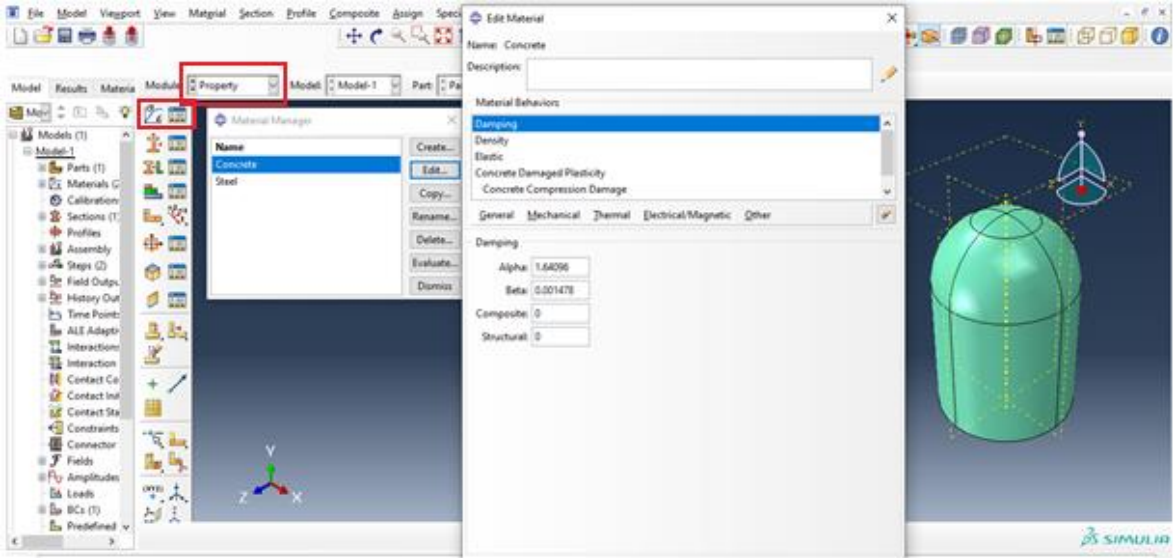
Abaqus programında yapıyı modellemek için sırasıyla parça tanımlama modülü(part), malzeme tanımlama ve atama modülü (property module), kesit oluşturma ve atama modülü(create and assign section), montaj (assembly) modülü, ağ oluşturma modülü (mesh) ve analiz ve yükleme türünü seçebildiğimiz adım ve yükleme modülü (steps and loads) bölümlerinden faydalanılmıştır.

İlk olarak, parça oluşturma modülünden, parça oluştur (create part) kısmından parçalar oluşturulur. Burada oluşturulmak istenen parçanın geometrik türü (2 boyutlu,3 boyutlu, kabuk eleman vs) belirlenir. Nükleer santral yapısı modellenirken 3 boyutlu ve deforme olabilen geometrik parça türü seçilmiştir.(Şekil 3.5).



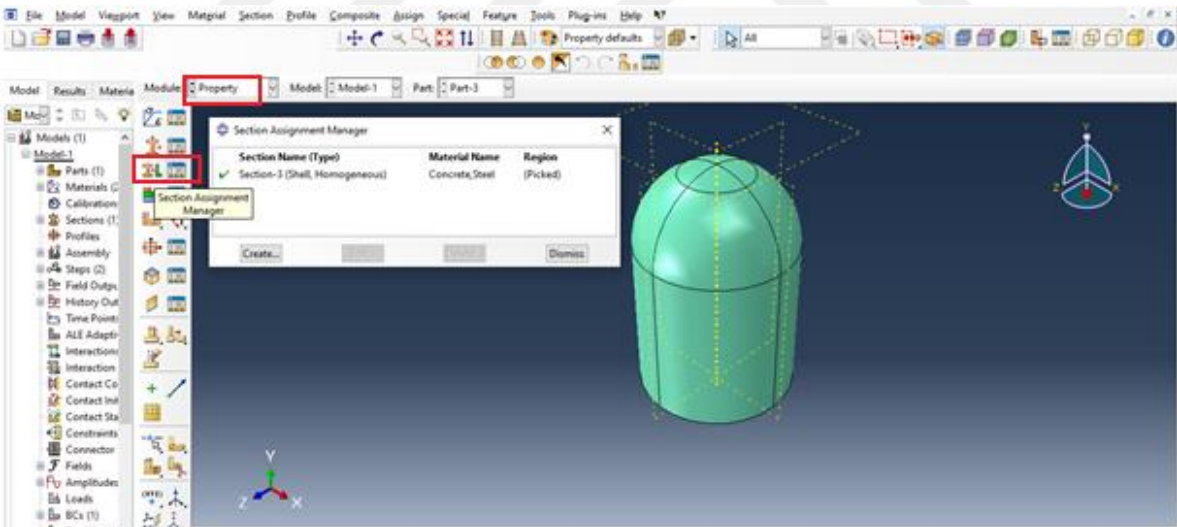
Şekil 3.5. Abaqus programında parça oluşturma

İkinci adımda, malzeme tanımlama modülü kullanılarak, malzemenin elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluğu gibi mekanik özellikleri tanımlanır. Yapı beton malzemesinden oluştuğu için, betonun mekanik özellikleri (sönümlenme oranı, beton hasarlı plastisite özellikleri, yoğunluğu, elastisite modülü, poisson oranları) bu menüden tanımlanmıştır (Şekil 3.6).



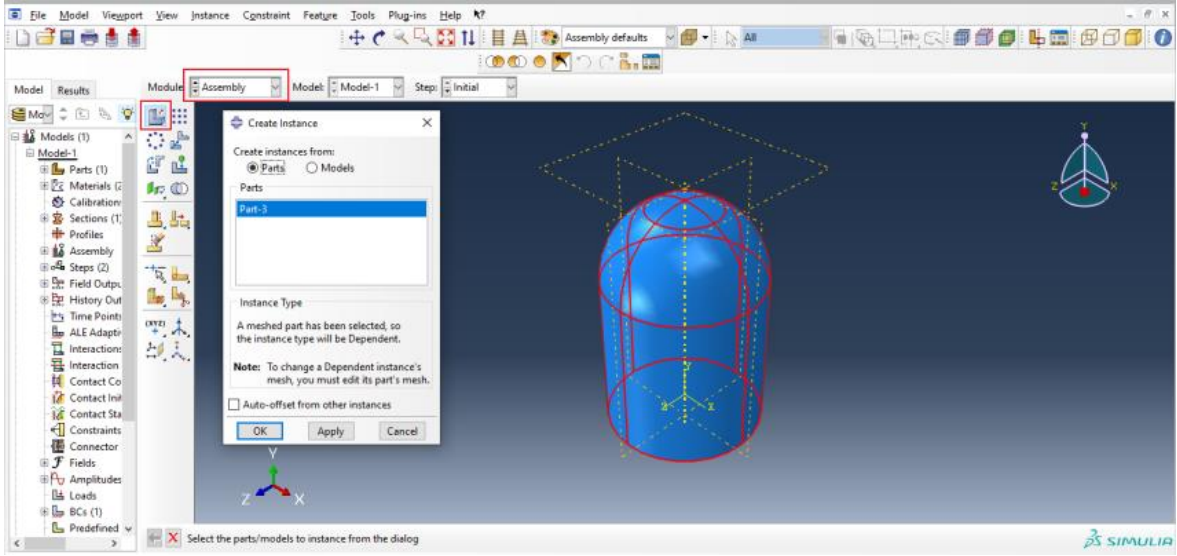
Şekil 3.6. Abaqus programında malzeme tanımlama

Malzeme tanımları tamamlandıktan sonra, aynı modülden tanımlanan malzeme istenilen kesite atanabilir (Şekil 3.7).



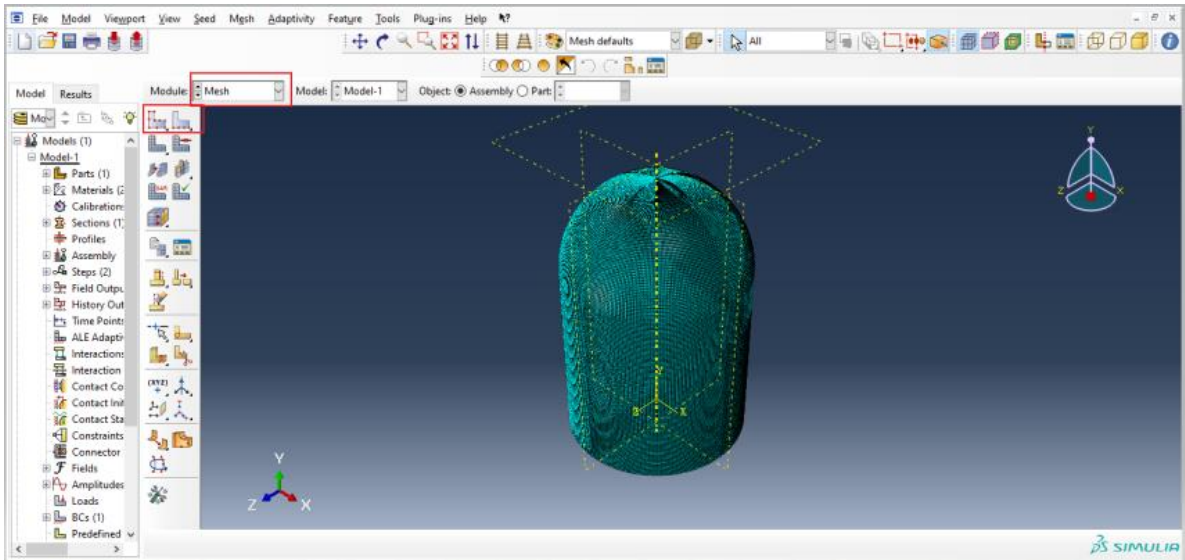
Şekil 3.7. Abaqus programında malzeme atama

Malzeme tanımı ve atama işlemi tamamlandıktan sonra, oluşturulan parça montaj (assembly) modülü kullanılarak montaj ortamına eklenir. İhtiyaç duyulduğu takdirde, birden fazla parça bir araya getirilerek montaj oluşturulabilir. Nükleer santral binası için parça tanımlama (create part) modülünde oluşturulan parçalar, bu modül ile bir araya getirilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Abaqus programında montaj oluşturma

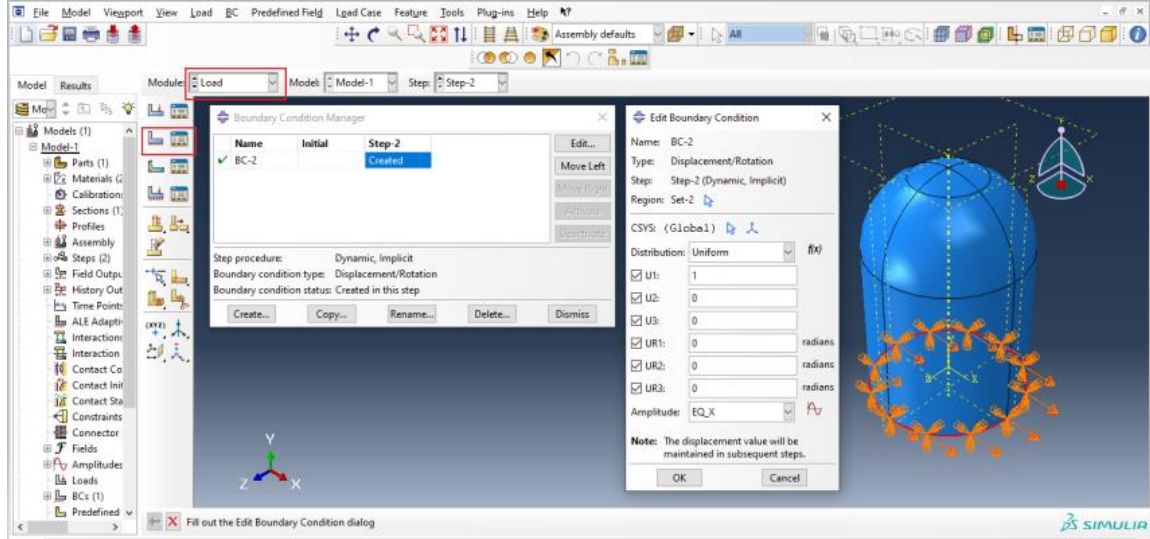
Modelin bir araya getirilmesinden sonra, modeli ağ haline getirme yani meshleme kısmına geçilir. Mesh modülü kısmındaki seed part menüsü kullanılarak ağ oluşturma parametreleri belirlenir ve mesh part seçeneği ile de yapı istenilen ağ boyutlarına parçalanabilir. Yapıda, ağ boyutu 0,5 m x 0,5 m olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Abaqus programında ağ oluşturma

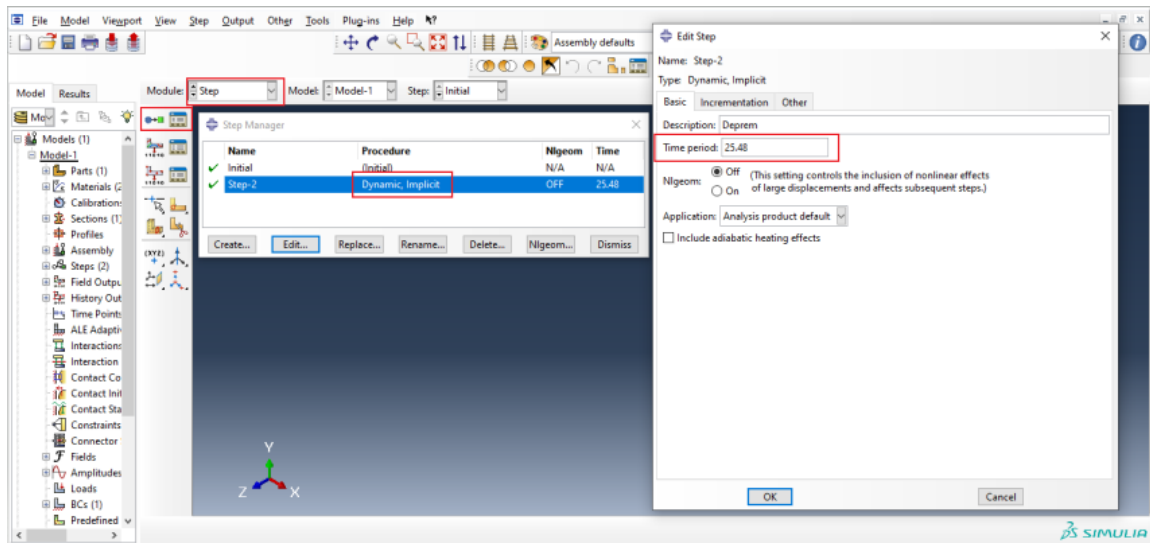
Yapı modellenmesi tamamlandıktan sonra yapı yükleri ve sınır şartları belirlenir. Yük modülünün (Load) altında bulunan yapının sınır şartlarını oluştur (create boundary condition) menüsünden, yapı sınır şartları tanımlanır. Nükleer santral binası için 1 yönünde

(X doğrultusu) deprem tanımlaması yapıldığından, 1 yönü (X doğrultusu) hariç diğer tüm yönler sınırlandırılmıştır (Şekil 3.10).



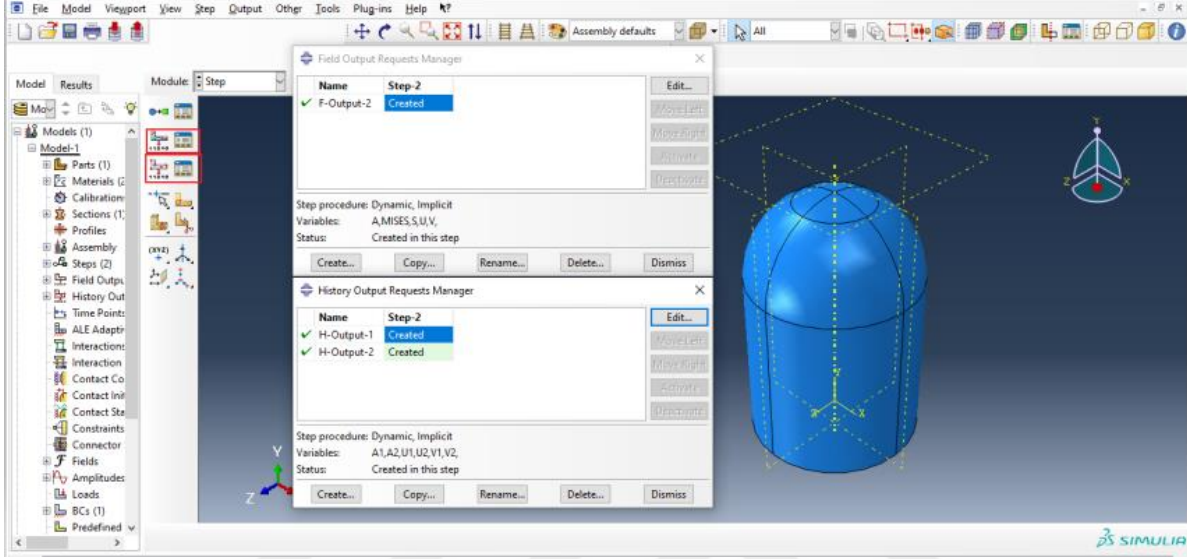
Şekil 3.10. Abaqus programında yapı yükleri ve sınır şartlarının tanımlanması

Yapı sınır şartları ve yük tanımlamaları tamamlandıktan sonra, analiz adımları ve analiz türleri belirlenir. Step modülüne geçilerek, analiz türü ve analiz süresi belirlenebilir. Çalışmada analiz türü olarak Implicit-dynamic analiz metodu seçilmiş ve analiz süreleri her bir deprem kaydı için deprem kayıtlarından faydalanılarak aşağıdaki gibi girilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Abaqus programında analiz adımları ve analiz türlerinin belirlenmesi

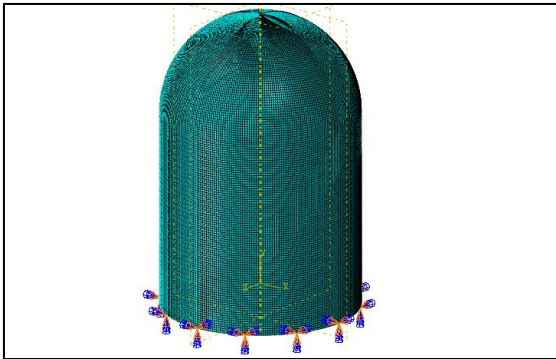
Analiz çıktılarında hangi parametre incelenmek ve sonuç alınmak isteniyorsa yine aynı modülden faydalanılmaktadır. Çalışmada rastgele titreşim analizi ve dinamik analiz yöntemleri kullanılarak yapıdaki yer değiştirme ve gerilme parametreleri incelenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Abaqus programında çıktı parametrelerinin ayarlanması

### 3.4.2. Yük ve sınır şartları

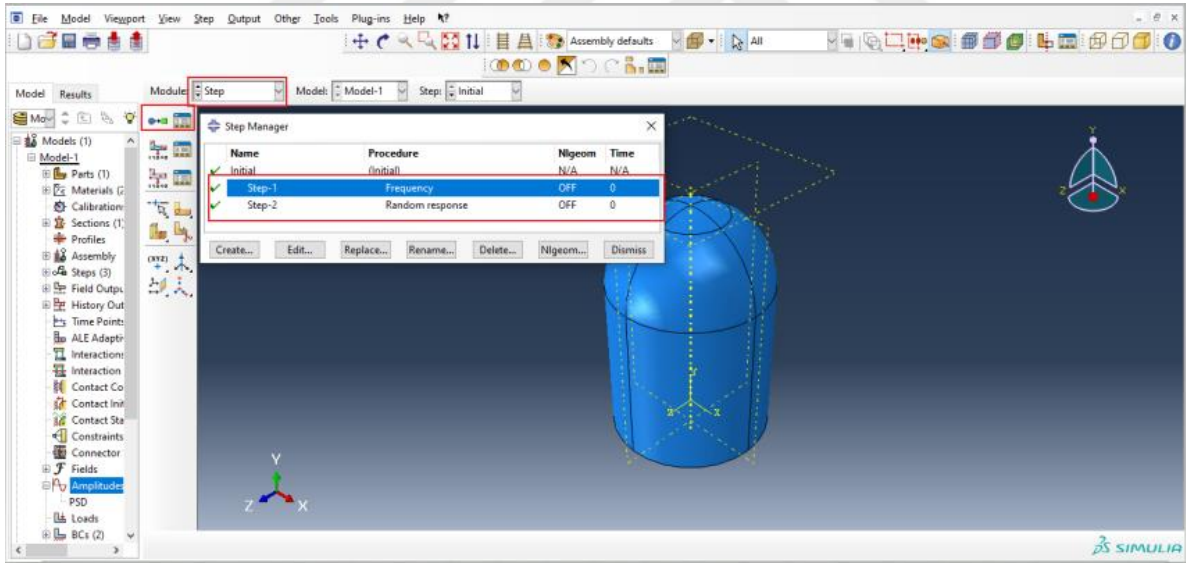
Yapının tabanı tüm yönlerde sınırlandırılmış, yükleme kısmı ise 1 yönünde (X doğrultusu), rastgele titreşim analizi için yer hareketi ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu tanımlanarak, deterministik dinamik analiz için ise ivme-zaman değişimleri tanımlanarak yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları ile analizlerin tanımlanma aşamaları aşağıda adım adım anlatılmıştır (Şekil 3.13).



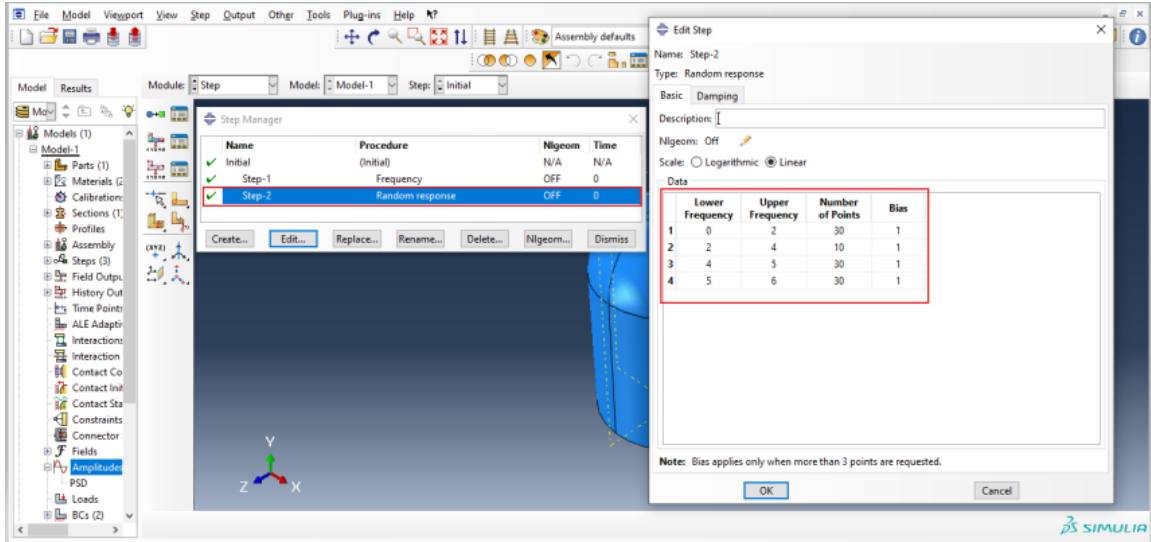
Şekil 3.13. Üç boyutlu sonlu eleman modelinde sınır koşulları

### Rastgele titreşim analizinin Abaqus programında tanımlanması

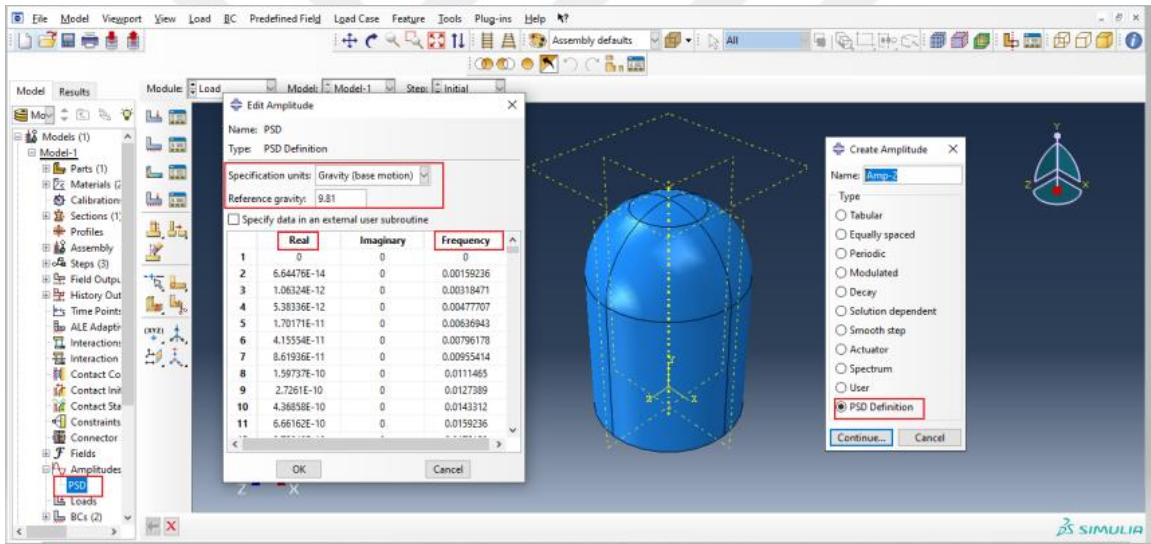
Rastgele titreşim analizi için ilk adım modal analizdir. Step modülünden adım türü olarak frekans adımı seçilir ve analiz yapılacak frekans aralığı, mod sayısı gibi parametreler belirlenir (Şekil 3.14). Daha sonra rastgele titreşim analizi için rastgele tepki adım türü seçilir (Şekil 3.15). Burada analizde incelenecek en yüksek ve en düşük frekans değerleri ve bu aralıktaki alt ve üst frekans aralığındaki veri noktalarının toplam sayısı belirlenir. Bias parametresi ise, veri noktalarının frekans ekseninde nasıl dağılacakını belirler. Burada bias değerinin 1 alınmasının sebebi ilgili veri noktalarının düşük ve yüksek frekanslara uzaklığının eşit olmasının istenmesidir. Modal analiz ve rastgele titreşim adımları tamamlandıktan sonra yük tanımları tamamlanır. Yer hareketi ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu oluşturulduktan sonra, genlik (amplitude) menüsünden yük türü olarak GSY tanımlanır ve spektrum verileri ile yer hareketinin yönü girilir (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17).



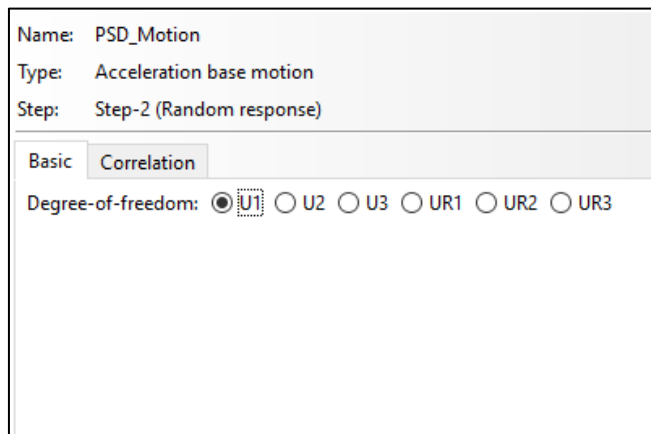
Şekil 3.14. Rastgele titreşim analizinde frekans adımının tanımlanması



Şekil 3.15. Rastgele titreşim analizinde rastgele tepki adımının tanımlanması



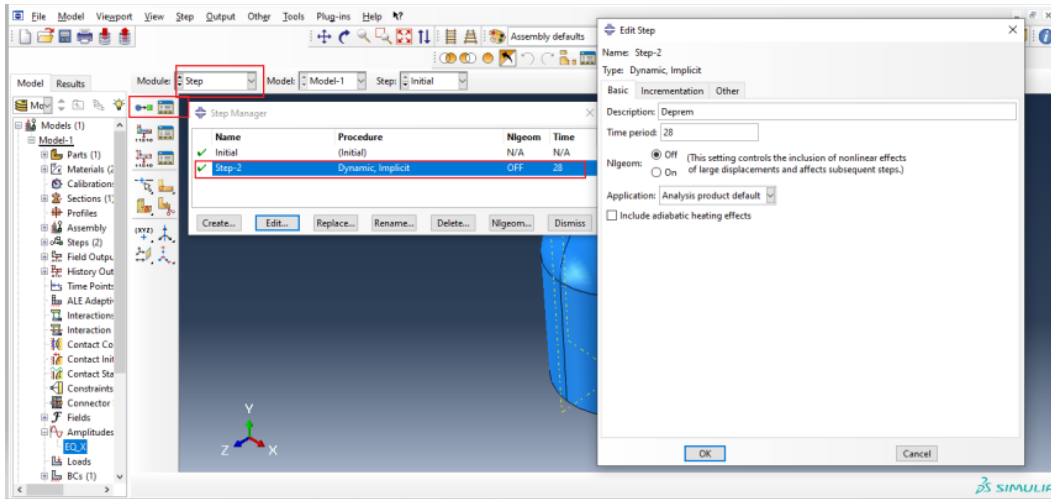
Şekil 3.16. Rastgele titreşim analizinde yük tanımı



Şekil 3.17. Rastgele titreşim analizinde U1 yönünde tanımlanan yer hareketi ivmesi

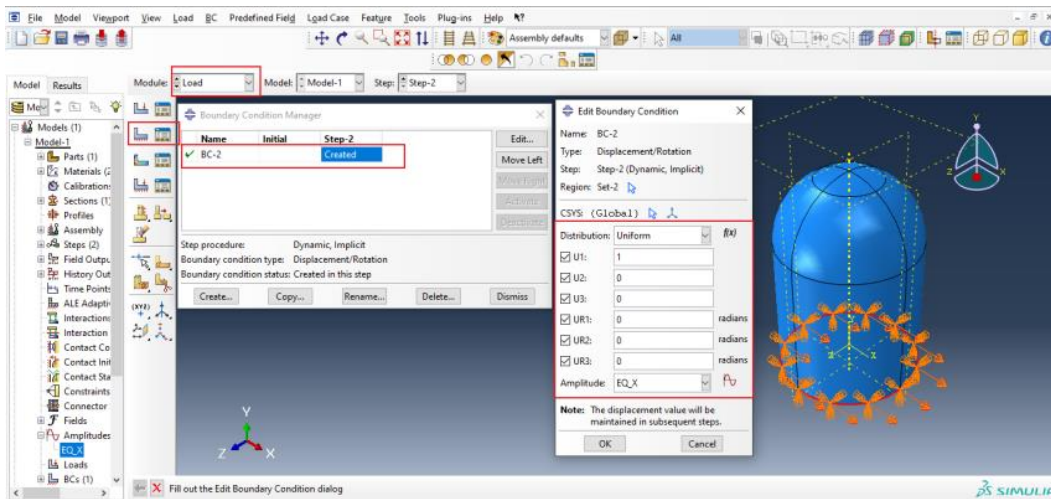
## Deterministik analiz yönteminin Abaqus programında tanımlanması

Deterministik dinamik analiz yöntemi için ise step adımı modülünden dinamik - implicit ya da dinamik-explicit gibi dinamik adım türü seçilir. Nükleer santral yapısı için dinamik-implicit adım türü seçilmiştir. Adım türü belirlendikten sonra analiz süresi de deprem kayıtlarından faydalanılarak belirlenir (Şekil 3.18).

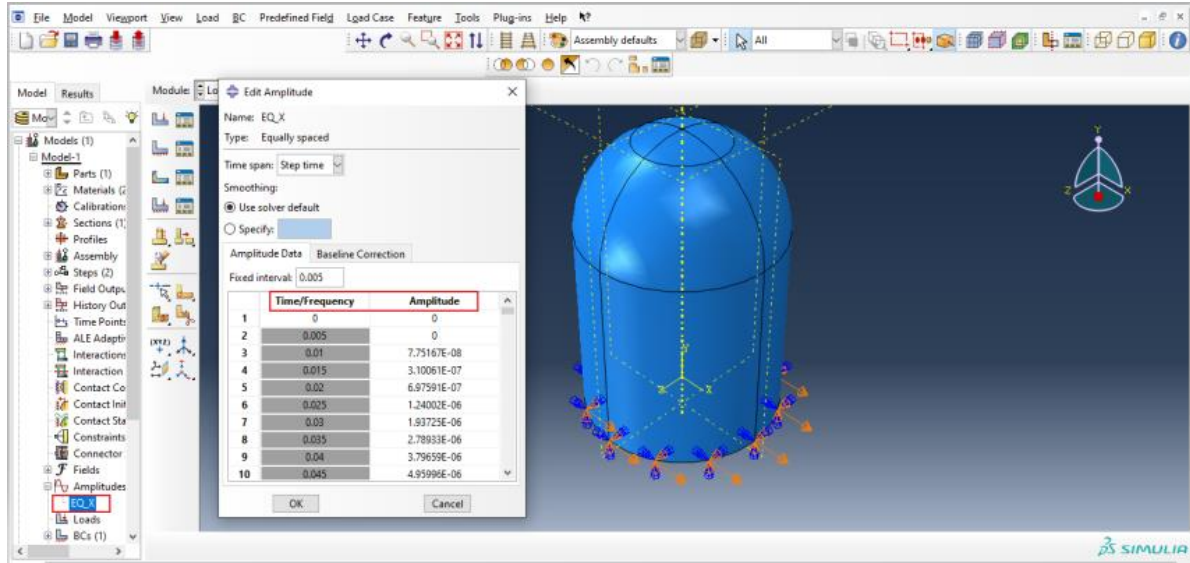


Şekil 3.18. Dinamik analizde analiz türü ve analiz süresinin belirlenmesi

Adım türü ve analiz süresi tamamlandıktan sonra yük tanımları tamamlanır. Yük tanımı, genlik (amplitude) menüsünden yer hareketinin ivme-zaman fonksiyonu girilir. Deprem yer hareketinin yapıya etki edecek yönü ise yük modülü (load) kullanılarak belirtilir (Şekil 3.19 ve Şekil 3.20).



Şekil 3.19. Dinamik analizde yük tanımı



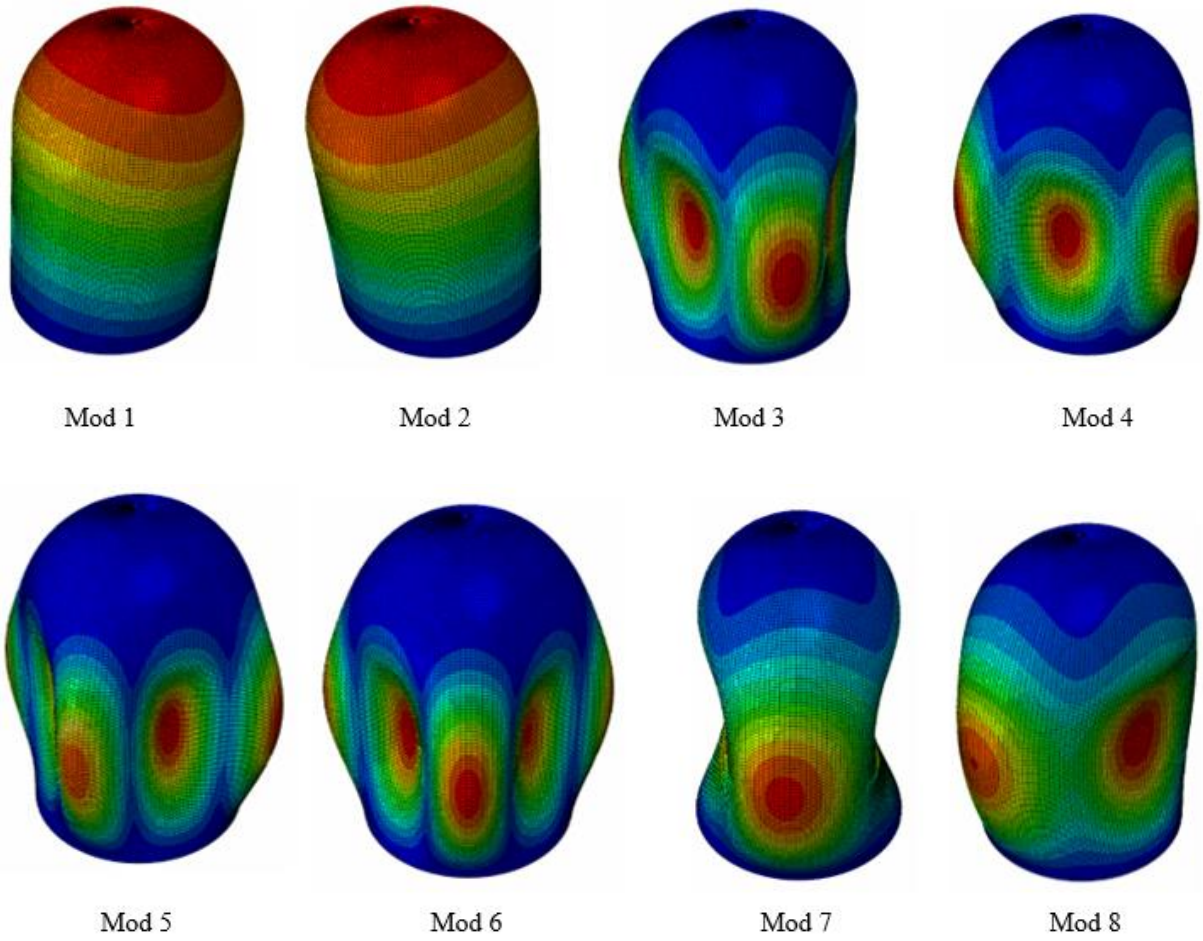
Şekil 3.20. Dinamik analizde yük tanımı

### 3.4.3. Modal özellikler

Yapının rastgele titreşim analizinden önce, modal özelliklerini elde etmek için modal analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21, sonlu eleman modeli için yapının ilk sekiz titreşim mod şeklini sunmaktadır. Modelin ilk sekiz modunun periyotları Çizelge 3.5' de verilmiştir. Buna göre yapının hakim frekansı yaklaşık 4,46 Hz' dir.

Çizelge 3.5. Santral binası modelinin doğal periyotları

Mod No	Periyot (s)	Frekans(Hz)
1	0,224	4,464
2	0,223	4,484
3	0,159	6,289
4	0,158	6,329
5	0,134	7,463
6	0,134	7,463
7	0,133	7,518
8	0,132	7,575



Şekil 3.21. Nükleer santral binasının mod şekilleri

### 3.5. Deprem Kayıtları

Her bir deprem için esas alınan deprem kayıtlarına ait bilgilere aşağıda yer verilmiştir (Çizelge 3.6 – 3.10). Çalışmada 0-20 km arası yakın fay, 20 km' den fazla olan faylar uzak fay olarak kabul edilmiştir. Ayrıca zemin sınıfını belirlemek için en önemli parametre olan  $V_{s30}$  değerinden faydalanılmıştır.  $V_{s30}$  değeri ilk 30 metredeki ortalama kayma hızıdır ve çalışmada 0-360 m/s yumuşak zemin, 360 - 700 m/s orta sınıflı zemin ve 700 m/s' den büyük ise sert zemin olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.6. ChiChi deprem kayıtlarına ait bilgiler

Deprem	İstasyon Adı	Mw	Fay Uzaklığı (km)	Zemin Sınıfı	Vs30 (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
ChiChi	TAP051W	7,62	83,22	D	215	0,036	9,747	0,276
	HWA033N	7,62	53,21	C	395,57	0,167	16,95	0,103
	ILA027E	7,62	103,46	B	1043	0,104	16,58	0,163

Kobe ve Kocaeli depremlerinde, zemin cinsinin yanı sıra uzak ve yakın fay etkileri de incelendiğinden her bir deprem için deprem kayıtları uzak ve yakın fay depremleri olarak iki ayrı tablo halinde gösterilmiştir. Aşağıda Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8 ‘de yakın faya Çizelge 3.9. ve Çizelge 3.10 ‘da uzak faya ait bilgilere yer verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kobe deprem kayıtlarına ait bilgiler (yakın fay)

Deprem	İstasyon Adı	Mw	Fay Uzaklığı (km)	Zemin Sınıfı	Vs30 (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
Kobe	Takatori	6,90	1,47	D	256	0,618	120,615	0,199
	Nishi - Akashi	6,90	7,08	C	609	0,464	38,244	0,084
	Kobe	6,90	0,92	B	1043	0,275	55,270	0,205

Çizelge 3.8. Kocaeli deprem kayıtlarına ait bilgiler (yakın fay)

Deprem	İstasyon Adı	Mw	Fay Uzaklığı (km)	Zemin Sınıfı	Vs30 (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
Kocaeli	Düzce	7,51	15,37	D	281,86	0,364	55,632	0,156
	Lamont 1058	7,14	0,21	C	529,18	0,077	14,282	0,189
	Gebze	7,51	10,92	B	792	0,261	44,595	0,174

Çizelge 3.9. Kobe deprem kayıtlarına ait bilgiler (uzak fay)

Deprem	İstasyon Adı	Mw	Fay Uzaklığı (km)	Zemin Sınıfı	Vs30 (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA(s)
Kobe	Kakogawa	6,90	22,50	D	312	0,324	26,859	0,084
	Berkeley - Strawberry Canyon	6,93	78,41	C	512,27	0,075	9,674	0,131
	SF-Rincon Hill	6,93	74,14	B	873,10	0,093	11,043	0,121

Çizelge 3.10. Kocaeli deprem kayıtlarına ait bilgiler (uzak fay)

Deprem	İstasyon Adı	Mw	Fay Uzaklığı (km)	Zemin Sınıfı	Vs30 (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
Kocaeli	Hava Alanı	7,51	60,05	D	354,37	0,084	16,097	0,194
	Mecidiyeköy	7,51	53,43	C	384,86	0,070	9,095	0,132
	Lamont 1060	7,14	25,88	B	782	0,022	9,978	0,452

Kocaeli ve Kobe depremlerinde daha önce bahsedilmiş olan kriterlere uygun B ve C sınıfından deprem kaydı bulunamamıştır. Bundan dolayı Kocaeli depremi için aynı yıl gerçekleşmiş olan Düzce depreminden, Kobe depremi için ise yaklaşık olarak aynı deprem büyüklüğünde olan Loma Prieta depreminden faydalanılmıştır.



## 4. ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde ilk olarak sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen farklı deprem hareketleri için, spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak rastgele titreşim analizi gerçekleştirilerek elde edilen yapısal tepkiler, FEBG modeli kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Öncelikle zemin cinsinin analiz sonuçlarına etkileri, sonrasında da filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek yer hareketini ne ölçüde yansıttığı ele alınmıştır. Daha sonra deterministik dinamik analiz ile rastgele titreşim analizi karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Son olarak da yakın fay etkisinin nükleer santral binası üzerindeki etkisi incelenmiştir.

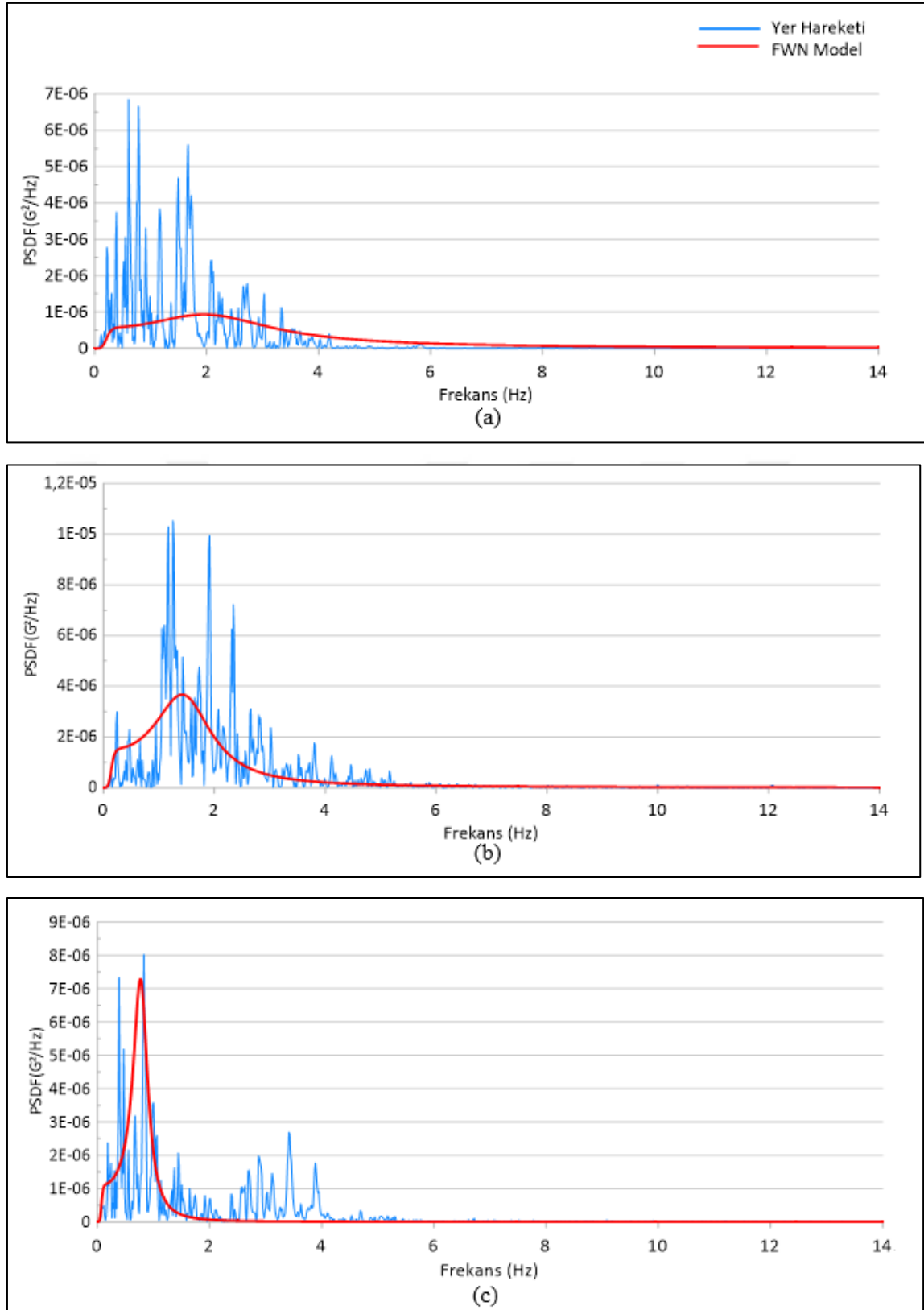
İlk olarak analiz sonuçları (yer değiştirme, gerilme ve güç spektral yoğunluk fonksiyonları) verilmiş olup hemen ardından analiz sonuçları üç aşamada kıyaslanarak yorumlanmıştır.

### 4.1. Chi-Chi Depremi

#### Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF)

ChiChi (1999), Tayvan depreminde sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen yer ivme hareketlerini belirlemek için ILA027E, HWA033N ve TAP051W isimlerinde istasyon bileşenleri kullanılmıştır. Her bir zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli ve ChiChi deprem yer hareketine ait ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Güç spektral yoğunluk fonksiyonu şekil ve grafiklerde İngilizce kısaltması olan PSDF kısaltması ile, şekil ve grafik haricinde Türkçe kısaltması olan GSYF ile tanımlanmıştır.



Şekil 4.1 Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

Analiz sonucunda, RU1 (yer değiştirmenin karesel ortalamasının karekökü), RV1 (yer değiştirmenin türevinin karesel ortalamasının karekökü) değerleri kullanılarak ortalama max değerler aşağıda verilen formülasyonlardan hesaplanmıştır (Wung CD ve Der Kiureghian A, 1989).

$$v_0 = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_z}{\sigma_z} \frac{1}{\pi} \left( \frac{\int_{-\infty}^{\infty} w^2 S_z(w) dw}{\int_{-\infty}^{\infty} S_z(w) dw} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

$$v_e = (1,9\xi^{0,15} - 0,73)v_0 \quad (4.2)$$

$$p = \sqrt{(2\ln v_e T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{(2\ln v_e T)}} \quad (4.3)$$

$$\mu = p\sigma_z \quad (4.4)$$

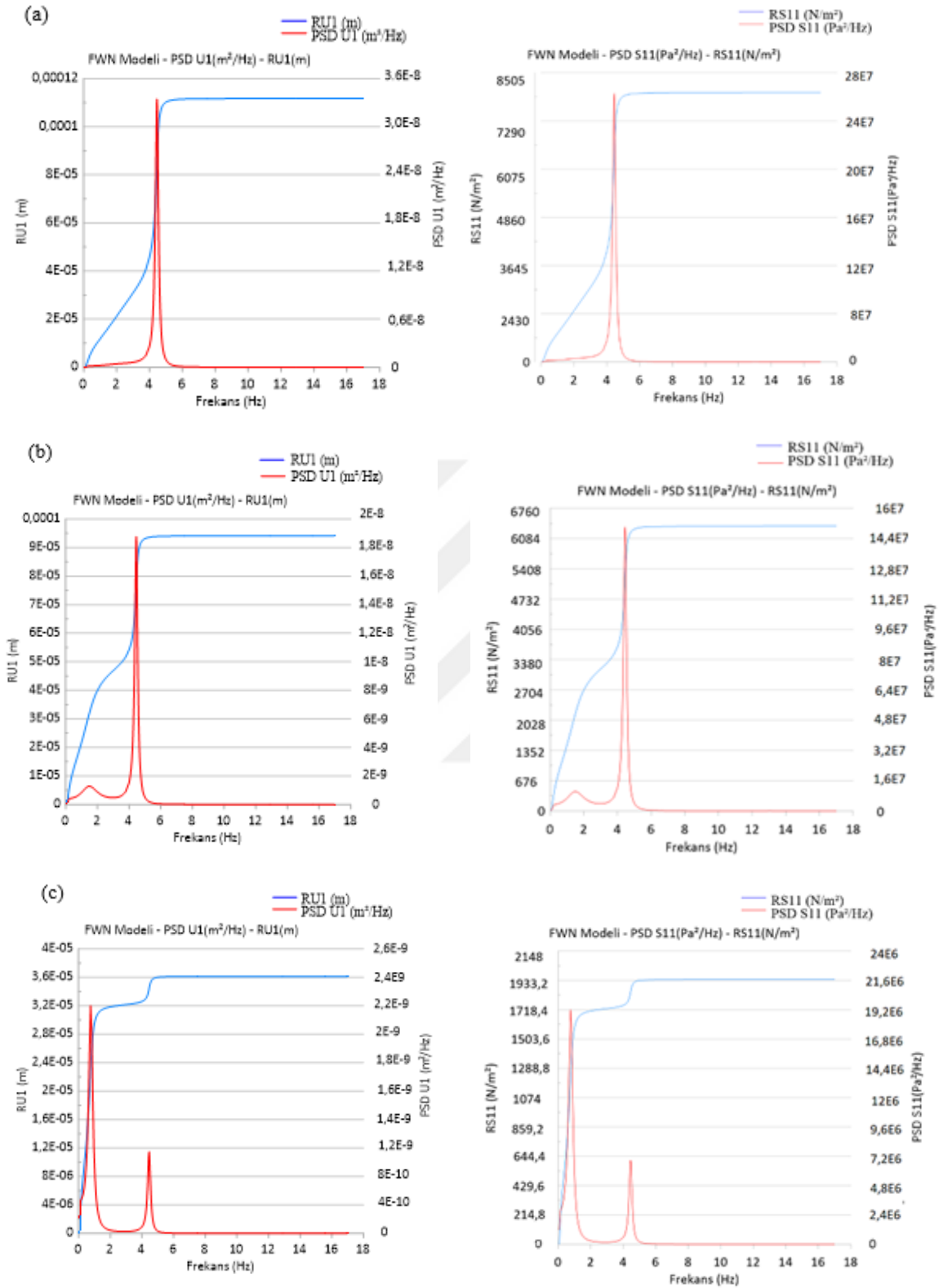
Eş. 4.1 sistemin karesel ortalamalarının karekök (KOK) hızını, Eş. 4.2 efektif hızı, Eş. 4.3. maksimum değeri, Eş. 4.4 ise ortalama maksimum değeri ifade eder. Eşitliklerde kullanılan T hareket süresini,  $\xi$  modal sönümlenme oranını,  $\sigma_z$  ve  $\sigma_{\dot{z}}$  ise sırasıyla x(t) işleminin ve türevinin standart sapmasını göstermektedir.  $\sigma_z$ , yapı deplasmanının KOK değeridir. Bir başka deyişle, sistemin ortalama olarak ne kadar yer değiştirdiğini ifade eder.  $\sigma_{\dot{z}}$ , yapı hızının KOK değerini ifade eder. Yer değiştirmenin ne kadar hızlı geręekleřtiđini gösterir. Çalışmada, hareket süresi her bir deprem hareketi için deprem kayıtlarından faydalanılarak belirlenmiş olup, sönümlenme oranı ise 0,05 (%5) kabul edilmiştir.

Max yer değiştirmeler yapının en üst noktasında oluşacağından, bu değerlere göre ortalama max yer değiştirme değeri Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). FEBG modeline ait tepe noktasının PSD U1 (m<sup>2</sup>/Hz), RU1(m), PSD S11 (Pa<sup>2</sup>/Hz) ve RS11(N/m<sup>2</sup>) değerleri grafik halinde Şekil 4.2 'de verilmiştir. Geręek deprem yer hareketine ait tepe noktasının PSD U1 (m<sup>2</sup>/Hz), RU1(m), PSD S11 (Pa<sup>2</sup>/Hz) ve RS11(N/m<sup>2</sup>) değerleri ise Şekil 4.3' de grafik halinde verilmiştir.

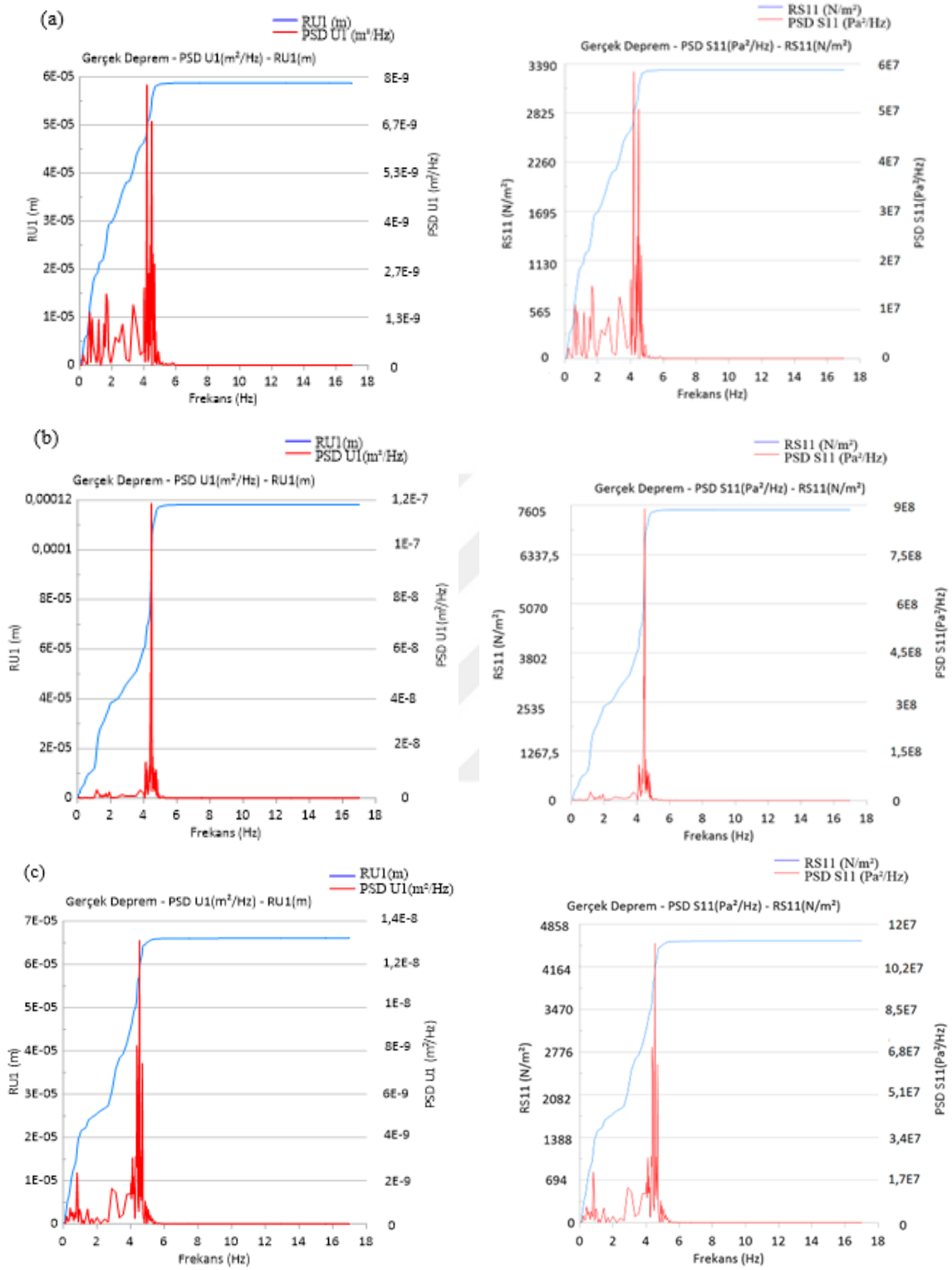
Çizelge 4.1. Analiz sonuçları

ChiChi		RU1 (m)	RV1 (m/s)	Maksimum			
				Ort. (mm)	U1 (mm)	RS11 (N/m <sup>2</sup> )	S11 (N/m <sup>2</sup> )
Fay Uzaklığı (km)	Gerçek Deprem						
83,22	Sert	5,88E-5	1,24E-3	0,181		3,38E3	
53,21	Orta	1,18E-4	3,04E-3	0,372		7,57E3	
103,46	Yumuşak	6,60E-5	1,57E-3	0,206		4,06E3	
	Filtre Edilmiş Yer Hareketi						
83,22	Sert	1,12E-4	3,00E-3	0,354		7,47E3	
53,21	Orta	9,40E-5	2,31E-3	0,295		5,95E3	
103,46	Yumuşak	3,61E-5	4,87E-4	0,106		1,80E3	
	Deterministik Analiz						
83,22	Sert				3,030		1,40E5
53,21	Orta				4,430		2,62E5
103,46	Yumuşak				3,480		1,70E5

Filtre edilmiş beyaz gürültü, şekil ve grafiklerde İngilizce kısaltması olan FWN kısaltması ile, şekil ve grafik haricinde Türkçe kısaltması olan FEBG kısaltması ile tanımlanmıştır.

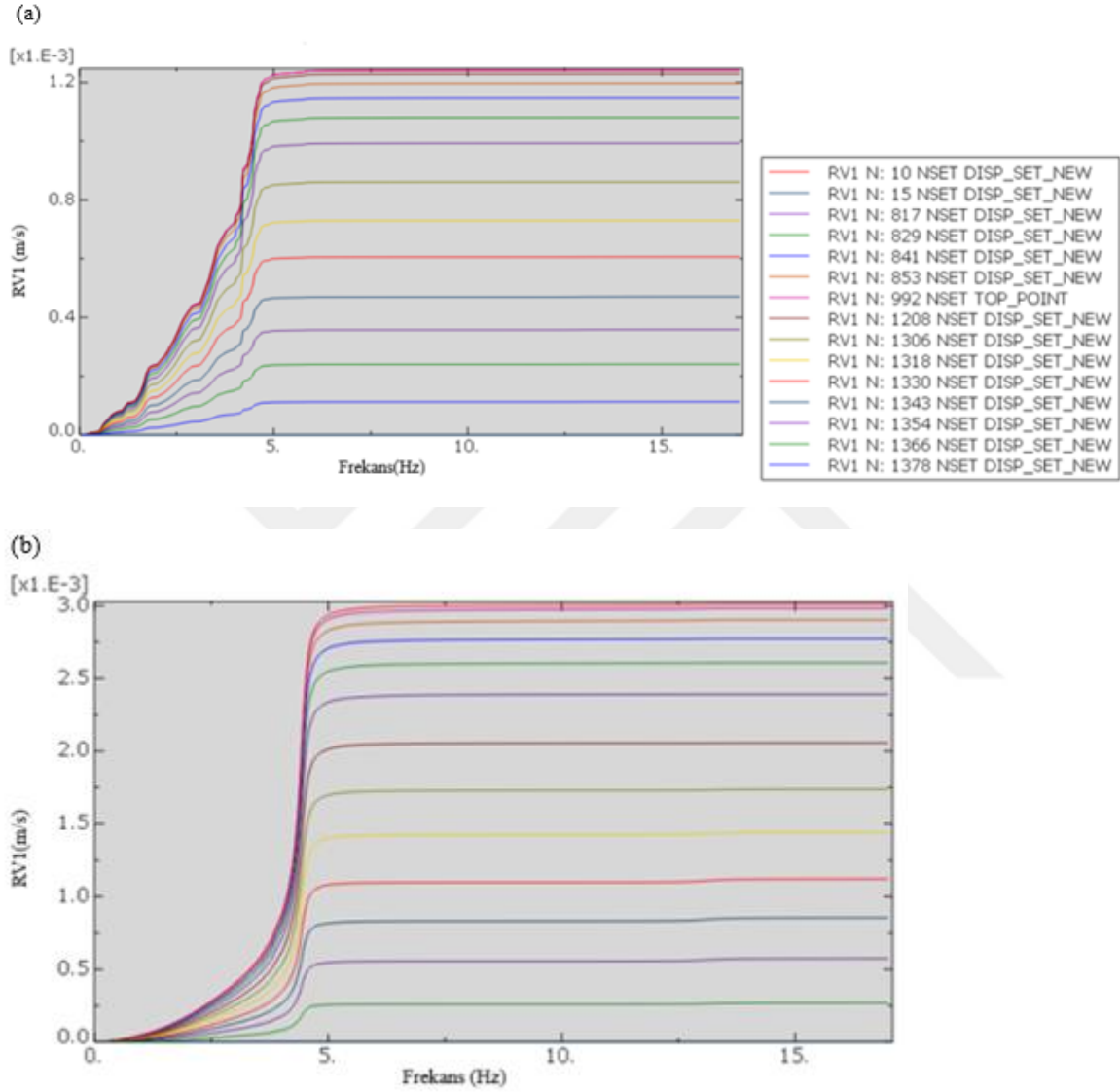


Şekil 4.2. FBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değıştirme ve gerilme değeri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

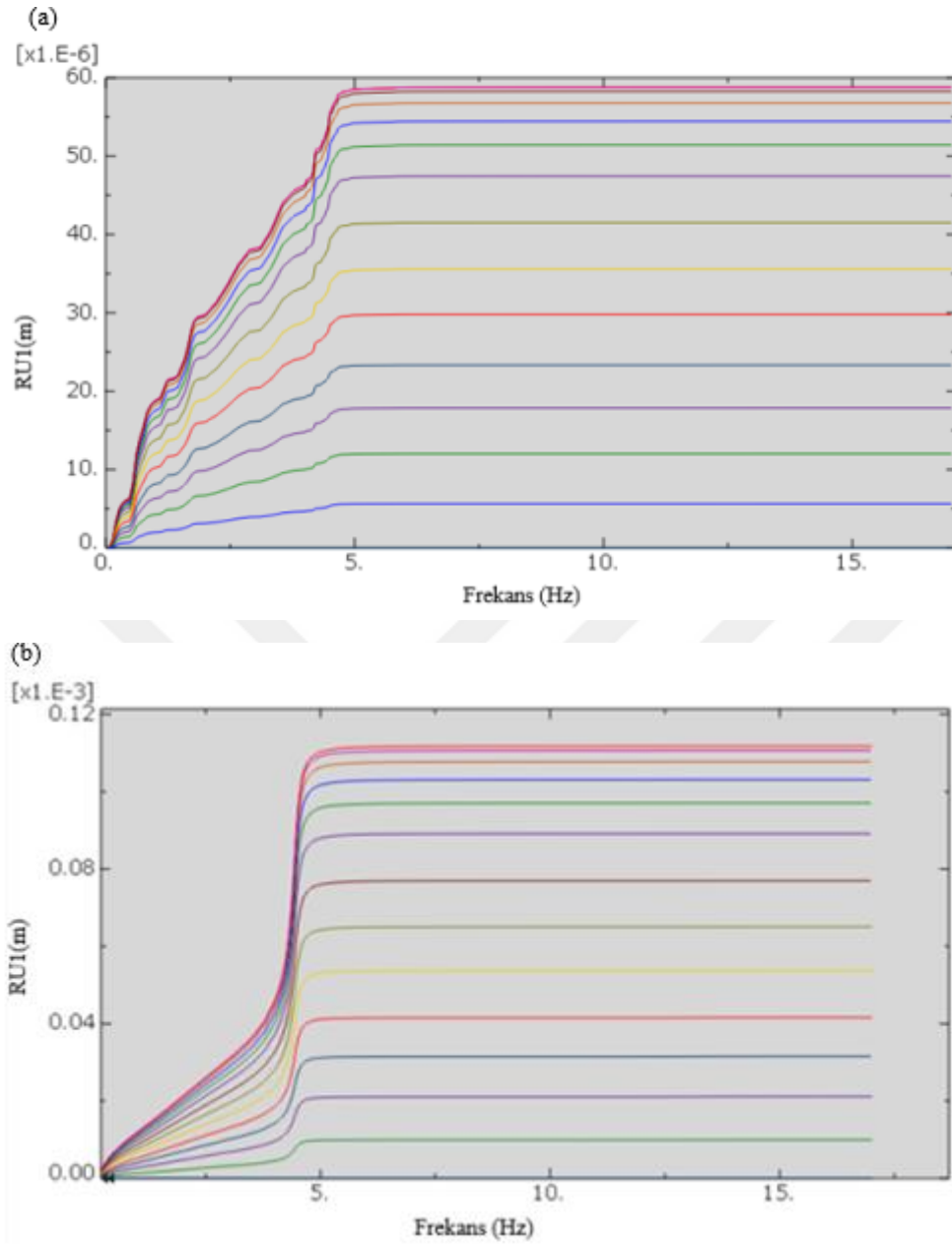


Şekil 4.3. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

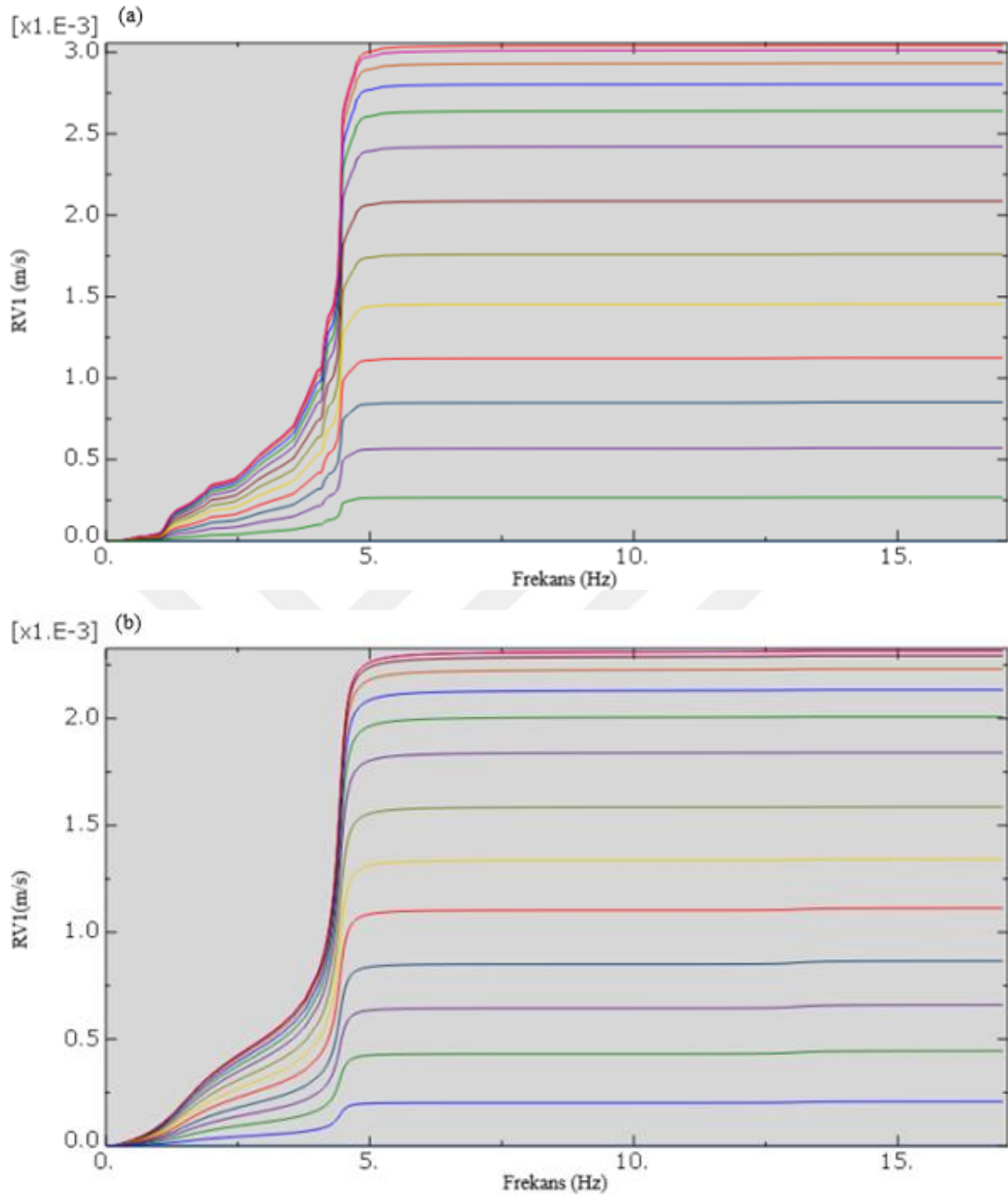
Santral binası yüksekliği boyunca sert zemin için elde edilen RU1(m) ve RV1(m/s) değerleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de, orta sınıflı zemin için Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de, yumuşak sınıflı zemin için Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’ da verilmiştir.



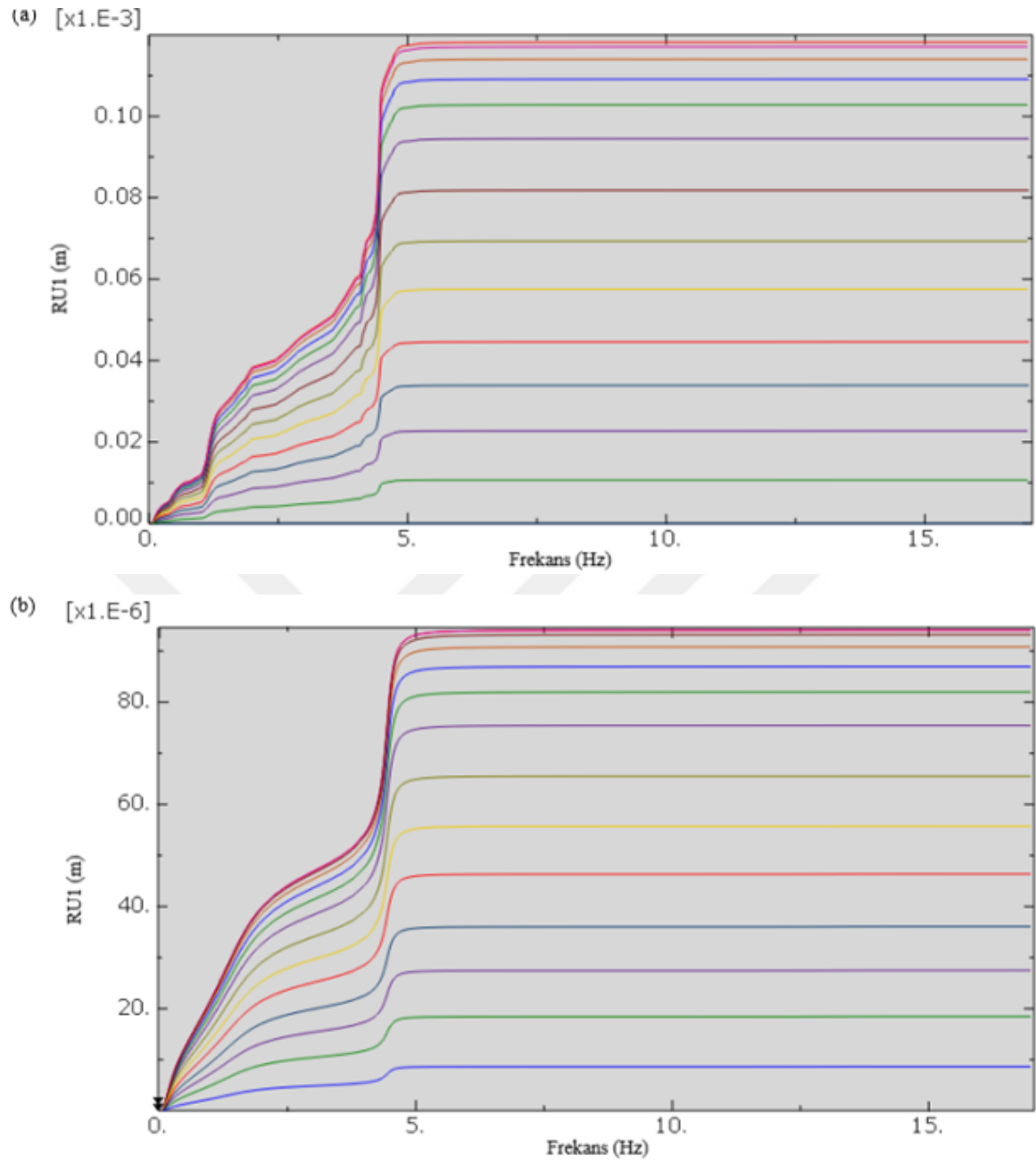
Şekil 4.4. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (ILA027E)



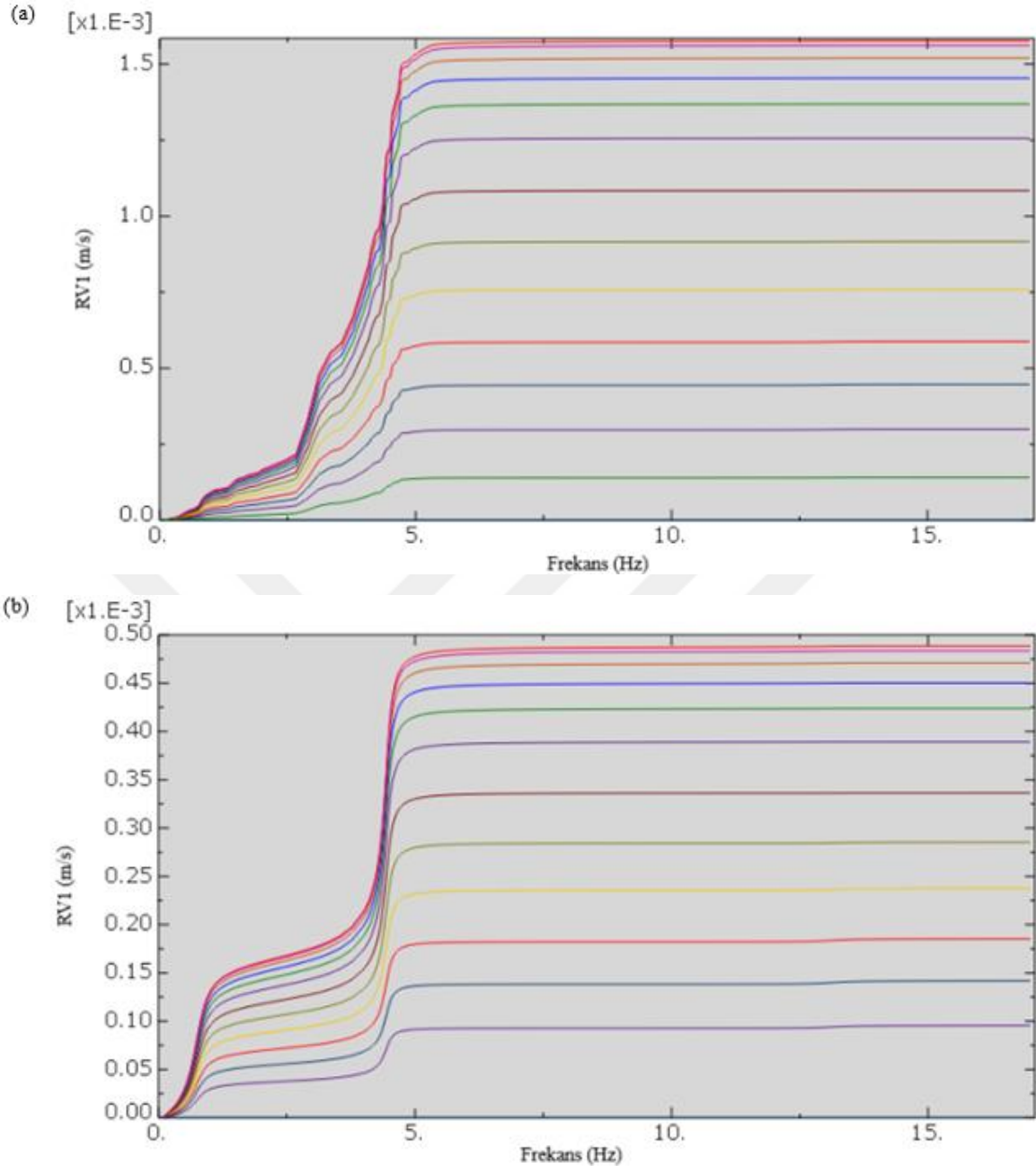
Şekil 4.5. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (ILA027E)



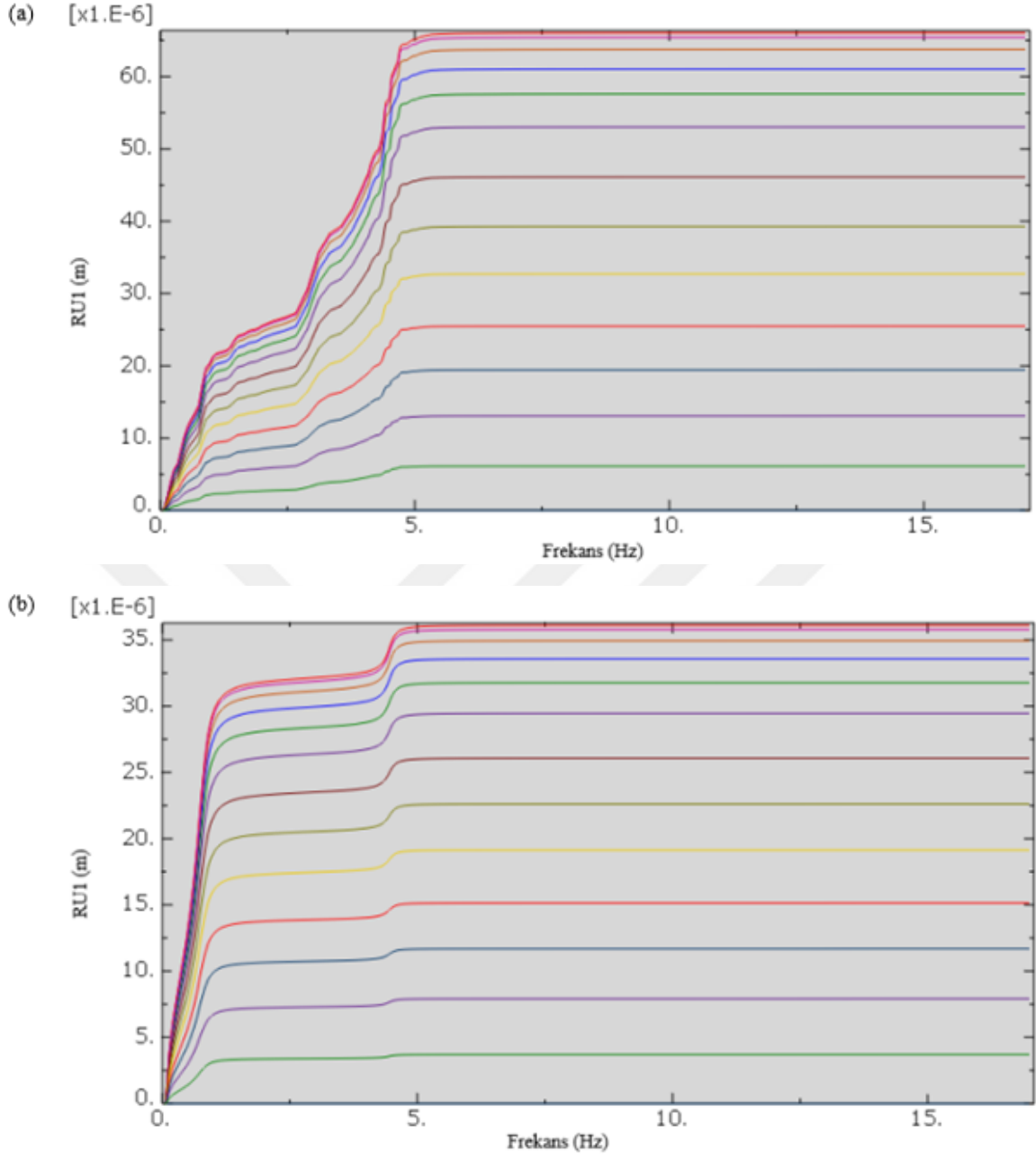
Şekil 4.6. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (HWA033N)



Şekil 4.7. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (HWA033N)

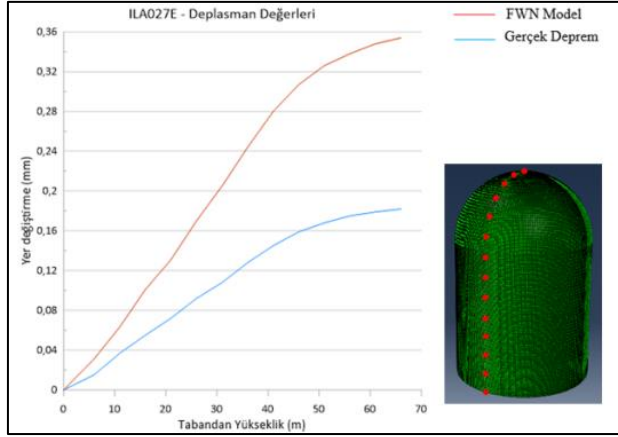


Şekil 4.8. Santral yüksekliği boyunca RV1 (m/s) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (TAP051W)

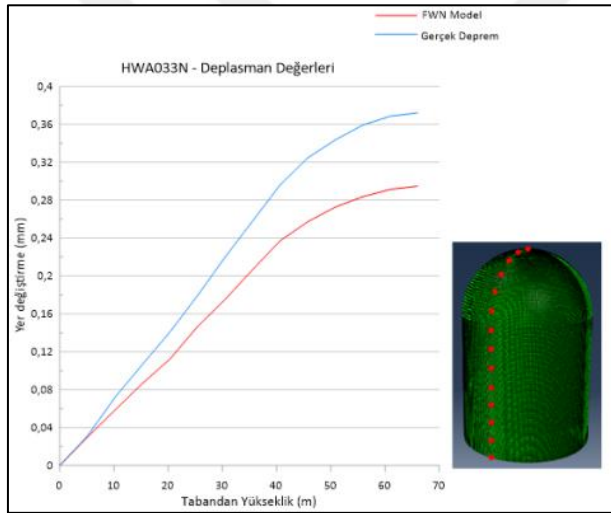


Şekil 4.9. Santral yüksekliği boyunca RU1 (m) değerleri (a) Gerçek Deprem, (b) FEBG Model (TAP051W)

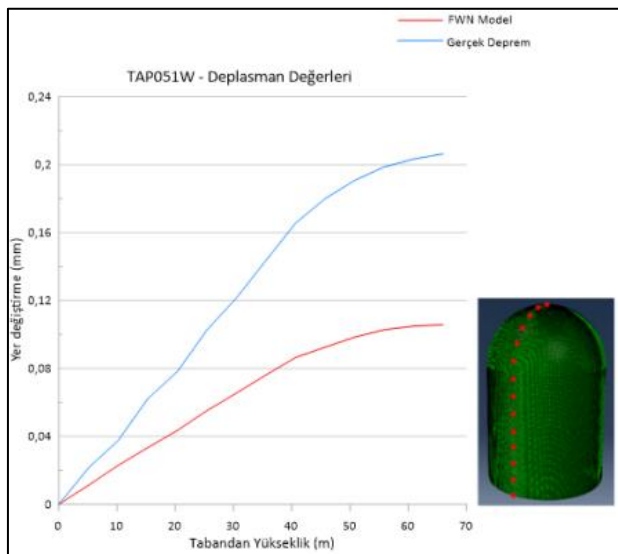
ChiChi deprem kaydı için FEBG ve gerçek deprem yer hareketine ait ortalama maksimum yer değiştirme sonuçları santral binasının en üst noktasından tabana doğru belirli aralıklarla işaretlenerek sert, orta ve yumuşak zemin cinsi için sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de verilmiştir.



Şekil 4.10. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (ILA027E-sert zemin)

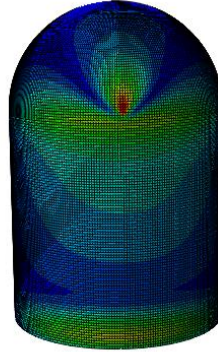
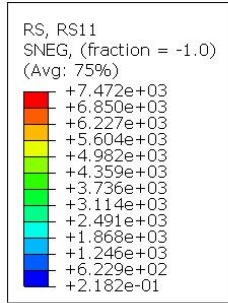


Şekil 4.11. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (HWA033N-orta sınıflı zemin)



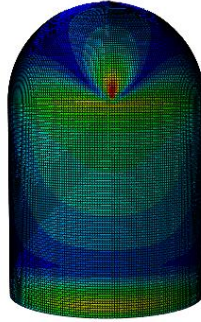
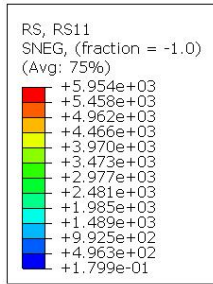
Şekil 4.12. Yer değiştirme – yükseklik grafiği (TAP051W-yumuşak zemin)

FEBG ve gerçek deprem hareketlerinin kullanıldığı rastgele titreşim analizi ile belirlenen asal gerilme bileşenini ifade eden gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



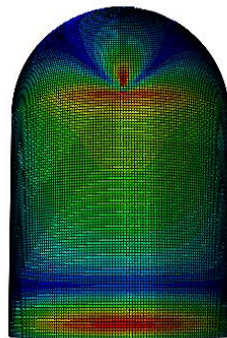
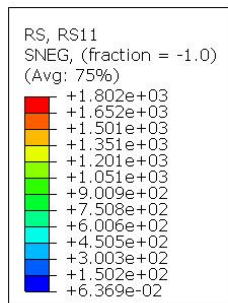
ODB: FWN\_FIRM.odb Abaqus/Standard 2020 Mon Aug 26 16:34:45 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2  
Increment 792: Frequency = 17.00  
Primary Var: RS, RS11

(a)



ODB: Job-3-FWN-MEDIUM2.odb Abaqus/Standard 2020 Tue Feb 27 21:39:36 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2  
Increment 792: Frequency = 17.00  
Primary Var: RS, RS11

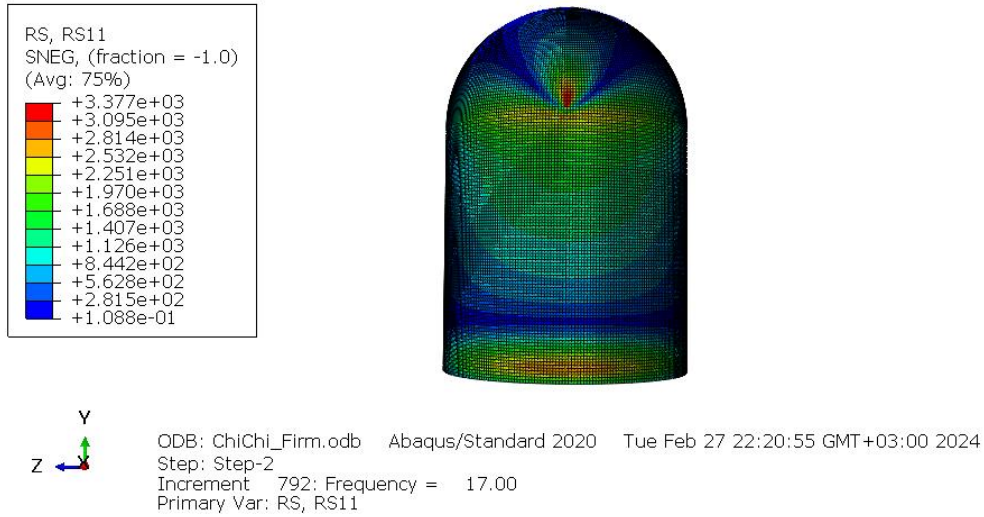
(b)



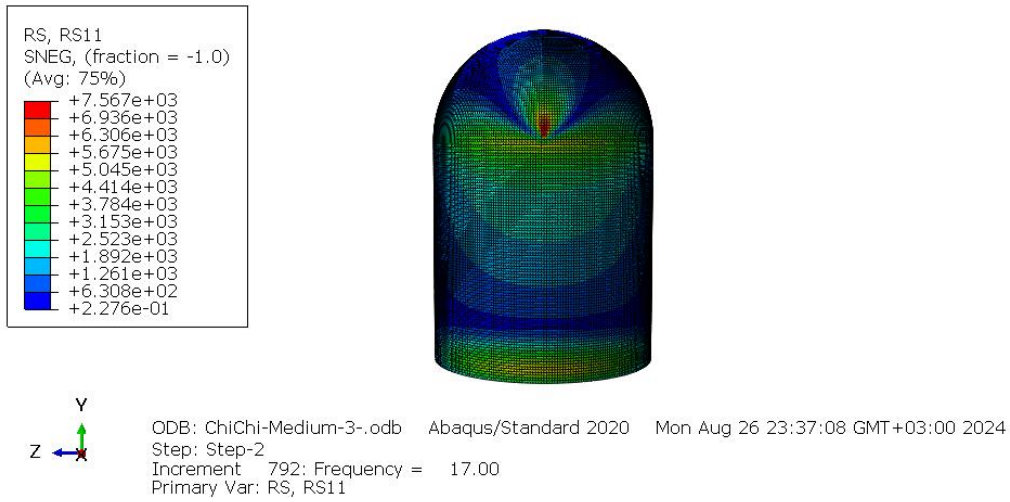
ODB: FWN-SOFT--.odb Abaqus/Standard 2020 Mon Aug 26 16:50:47 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2  
Increment 792: Frequency = 17.00  
Primary Var: RS, RS11

(c)

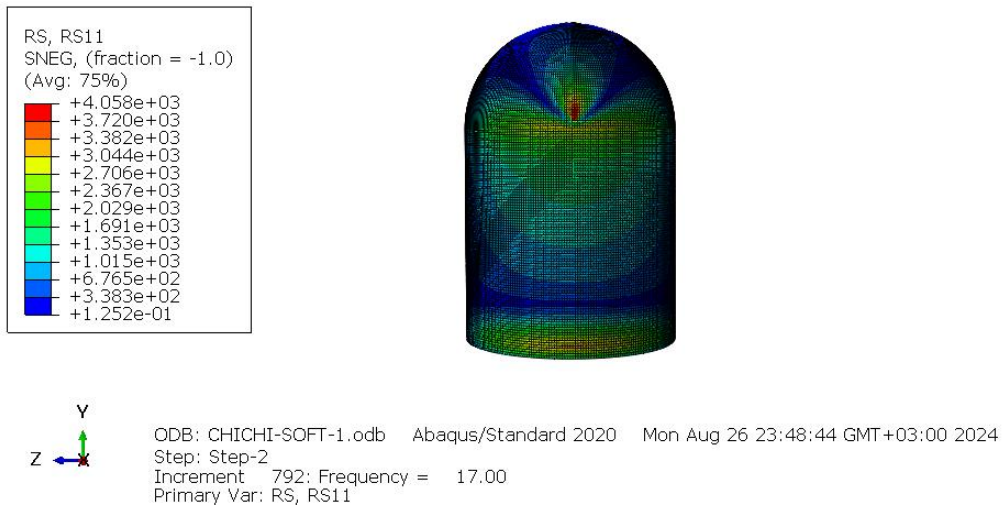
Şekil 4.13. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan max gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.14. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan max gerilmeler  
(a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

#### 4.1.1. Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme

Bu bölümde FEBG modeli için elde edilen sonuçlar, gerçek deprem hareketi için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak FEBG modelinin gerçek deprem hareketini ne ölçüde yansıttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.1'e bakıldığında FEBG modeli ve gerçek deprem ile oluşturulmuş güç spektral yoğunluk fonksiyonunun altında kalan alanların birbirine eşit olduğu görülmektedir. Bir değişkene ait GSY grafiği, sistemin hangi frekanslarda rastgele yüklemeye etkileneceği ile ilgili bilgi sağladığından, çalışmada yer değiştirme ve gerilmeye ait GSY grafikleri verilmiştir. Bunun yanında bir değişkenin varyansına (karesel ortalamasına) bakılarak genel bir değerlendirme yapmak mümkün olup, bu amaçla KOK (karesel ortalamasının karekökü) kullanıldığından, burada yer değiştirme ve gerilme için ayrıca KOK değerleri de verilmektedir. Bilindiği üzere güç spektral yoğunluk fonksiyonu altında kalan alanın karekökü, karesel ortalamasının karekök değerine (KOK) eşit olmaktadır. KOK, değişkenin kendisiyle aynı birime sahip olduğu için varyans yerine kullanılması tercih edilmektedir.

Rastgele titreşim analizi sonucunda gerek gerçek yer hareketi gerekse de FEBG modeli için santral binası tepe noktasına ait yer değiştirme ve gerilme bileşenleri için PSD U1, PSD S11 (güç spektral yoğunluk fonksiyonu) ve RMS U1, RMS S11 (karesel ortalamasının karekökü) değerleri frekansa bağlı olarak belirlenmiş ve Şekil 4.2-4.3'de verilmiştir.

Görüleceği üzere dinamik tepkilere ait grafiklerde genel olarak tek bir tepe noktası gözükmemektedir ki bu durumda rezonansa işaret etmektedir. Gerçek deprem hareketine karşılık gelen spektral yoğunluk fonksiyonu grafikleri (Şekil 4.1) incelenecek olursa, santral binasının birinci doğal frekansını (4,46 Hz) da kapsayan bir frekans aralığında spektral yoğunluk fonksiyonunun değiştiği görülmektedir. Bu durumda da küçük frekans değerlerinde de küçük tepe noktaları olmakla birlikte, esas olarak santral binasının hakim frekansına yakın frekans bölgesinde tepe noktaları ortaya çıkmıştır. Başka bir ifade ile bu noktalarda yapıya uygulanan titreşim frekansının yapının hakim frekansına yakın olduğunu ve böylelikle de yapı sisteminde rezonans durumunun ortaya çıktığını göstermektedir. Bunun yanında FEBG modeli için elde edilen GSY ve KOK grafikleri incelenecek olursa sert zemin cinsi için yapı hakim frekansında (4,46 Hz) tek bir tepe noktası gözlenmektedir. Sert zemin cinsinde FEBG modeline ait GSY grafiğine bakılacak olursa, yapı hakim

frekansını da içeren frekans bölgesi boyunca GSY grafiği değişim gösterdiğinden, yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde bir tepe noktası ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Orta zemin cinsi için elde edilen GSY grafiği incelenecek olursa en büyük tepe noktası yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde ortaya çıkmakla birlikte, Şekil 4.1' de görüldüğü gibi orta zemin cinsine ait GSY grafiği 1,7 Hz civarında bir tepe noktası içerdiğinden, yer değiştirme tepkisi için de (PSD U1) bu frekans bölgesinde küçük bir tepe noktası gözükmemektedir. Yumuşak zemin cinsi için elde edilen yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD U1) incelendiğinde ise sert ve orta zemin cinsleri için elde edilen değişimden farklı bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.1' de de görüleceği üzere yumuşak zemin cinsine ait FEBG modeli GSY grafiğinde 0,9 Hz bölgesinde, dar bir frekans bölgesi boyunca belirgin bir tepe noktası olduğundan, PSD U1 grafiğinde de bu bölgede bir tepe noktası gözlenmektedir. Bunun yanında yine yapı hakim frekans bölgesinde ikinci bir küçük tepe noktası ortaya çıkmıştır.

Dolayısıyla sonuçlar üzerinde, gerek dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin gerekse de yapı sisteminin hakim frekansının etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görüldüğü gibi gerçek yer hareketi ve FEBG yer hareketi modeli için elde edilen tepki değerleri karşılaştırıldığında, sert zemin cinsi için FEBG modelinin, orta ve yumuşak zemin cinsi için ise gerçek yer hareketi modelinin daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum gerçek ve FEBG modeli için çizilen GSY grafiklerine bakılarak anlaşılabilir (Şekil 4.1). Şekillerden görüleceği üzere santral binası hakim frekansına  $f=4,46\text{Hz}$  karşılık gelen GSY değerleri, sert zeminde FEBG modeli için, orta ve yumuşak zemin durumunda ise gerçek yer hareketi modeli için daha büyüktür. Yapı hakim frekans bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında yer hareketi modeli olarak gerek gerçek yer hareketine gerekse de FEBG modeli için oluşturulan güç spektral yoğunluk fonksiyonları dikkate alınarak rastgele titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme, hız ve gerilme için elde edilen dinamik tepkiler incelendiğinde, gerçek yer hareketine ait ve FEBG modeline ait GSY kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. FEBG modeli için

sert, orta ve yumuşak zemin cinsi için  $S_0$  değerleri, gerçek yer hareketinin varyansı, FEBG modelinin varyansına eşitlenmek suretiyle bulunmasına rağmen sonuçlar arasındaki farklılık dikkat çekicidir. Her iki yer hareketi modeli için GSY grafikleri altındaki alanlar her bir zemin cinsi için birbirine eşit olmakla birlikte, gerçek deprem hareketine ait GSY grafikleri seçilen deprem hareketine bağlı olarak farklı iniş çıkışlar göstermektedir. Bu da dinamik tepkiler üzerinde etkili olmaktadır. Farklı bir deprem hareketinin seçilmesi durumunda yine GSY grafiğinde farklı iniş-çıkışlar olacağından, dinamik tepkiler yine değişkenlik gösterecektir. Bu nedenle seçilecek tek bir deprem hareketine bağlı olmayan FEBG modelinin kullanılması, tepkilerin seçilecek deprem hareketine bağlı kalmasını oldukça sınırlayacaktır.

#### 4.1.2. Zemin cinsine göre değerlendirme

Bu bölümde zemin cinsleri arasında genel bir değerlendirme yapılarak, farklı zemin koşullarının yapıda ne gibi farklı etkilere neden olduğu incelenmiştir.

Çizelge 4.1'den görüleceği üzere gerek rastgele titreşim analizinde, gerekse de deterministik dinamik analizde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen tepkiler düzenli bir değişim göstermemektedir.

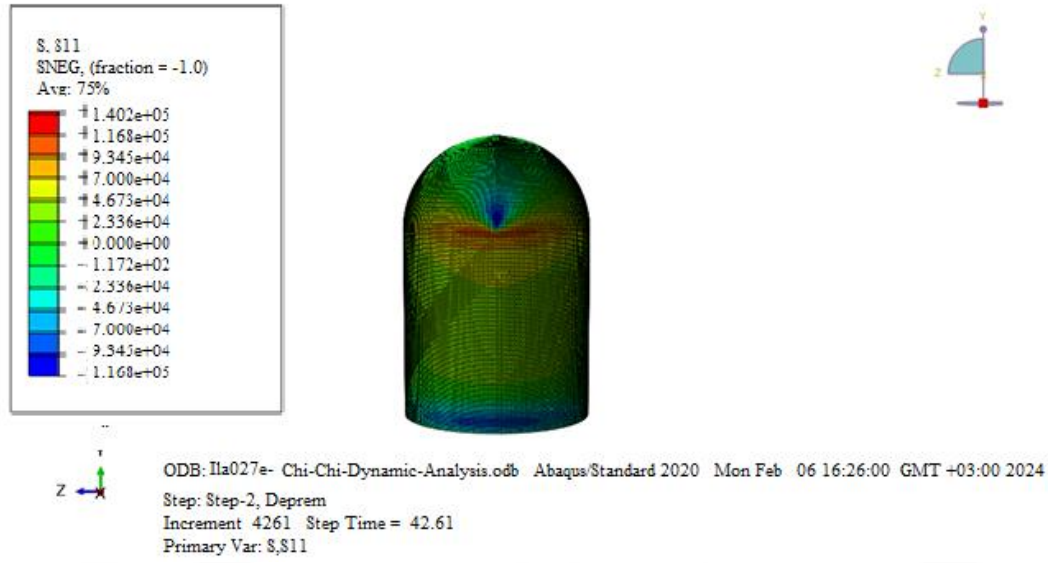
Deterministik dinamik analizde en büyük yer değiştirme ve gerilmeler orta zemin cinsi için elde edilirken, en küçük tepkiler sert zemin cinsi için elde edilmiştir. Aynı değişim, gerçek yer hareketine ait GSY grafiğinin kullanıldığı rastgele titreşim analizinde ortaya çıkmıştır. FEBG modeli kullanılarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analizinde ise maksimum tepkiler sert zemin durumunda ortaya çıkarken, en küçük tepkiler yumuşak zemin cinsi için elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Bu durum yine yer değiştirme güç spektral yoğunluk fonksiyonuna (PSD U1) bakılarak anlaşılabilir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de görüleceği üzere santral binası hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük GSY genliğine sahip olan zemin durumları için daha büyük tepkiler elde edilmiştir. Bu durumda zemin cinsinin farklılığından ziyade, yer hareketine ait GSY frekans içeriği ile yapı hakim frekansı arasındaki ilişkinin tepki değerlerinin daha büyük ve daha küçük olmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

### 4.1.3. Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme

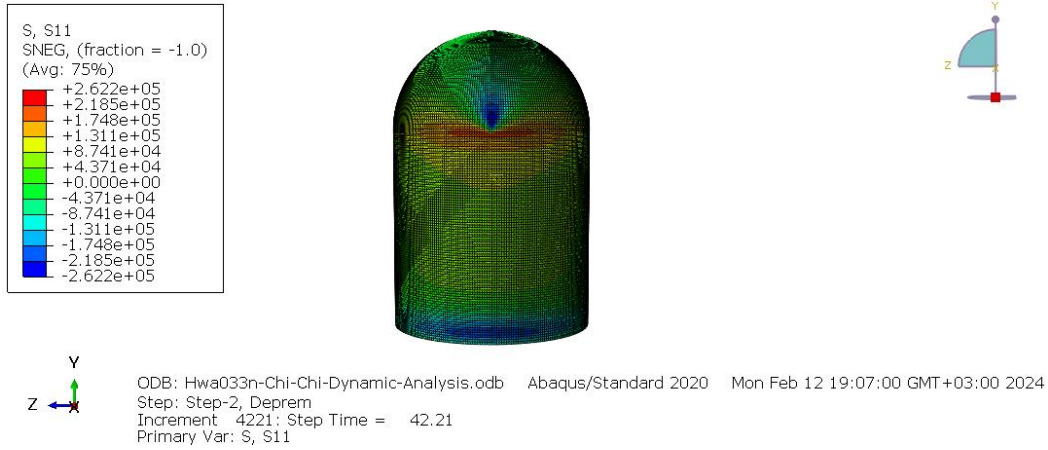
Bu bölümde deterministik analiz ile rastgele titreşim analiz sonuçları kıyaslanarak, rastgele titreşim analizi ile bulunan yapısal tepkilerin deterministik analiz sonuçları ile ne ölçüde uyumlu olduğu belirlenmeye çalışılacaktır.

Ortalama maksimum yer değiştirme, bir yapının rastgele titreşim analizi sırasında yapının en büyük yer değiştirme değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Bu tanıma göre, ortalama maksimum değerin, maksimum yer değiştirmeden daha küçük olması doğaldır. Rastgele titreşim analizi sonucunda elde edilen ortalama maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme sonuçları ile deterministik analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilme sonuçları kıyaslandığında, deterministik analiz sonucunda elde edilen tepkilerin beklenildiği gibi belirgin bir şekilde daha büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1, Şekil 4.15, Şekil 4.16).

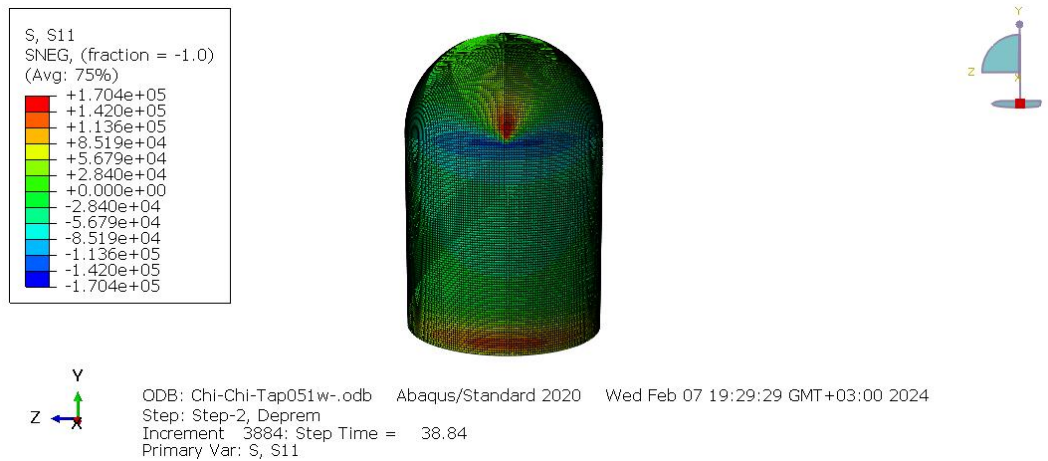
Ayrıca, gerçek yer hareketinin dikkate alındığı rastgele titreşim analizi ile deterministik analiz arasında yapılan karşılaştırmada, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, ChiChi depreminde her iki analizde orta sınıflı zeminde en büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görülürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme sert zeminde ortaya çıkmıştır.



(a)

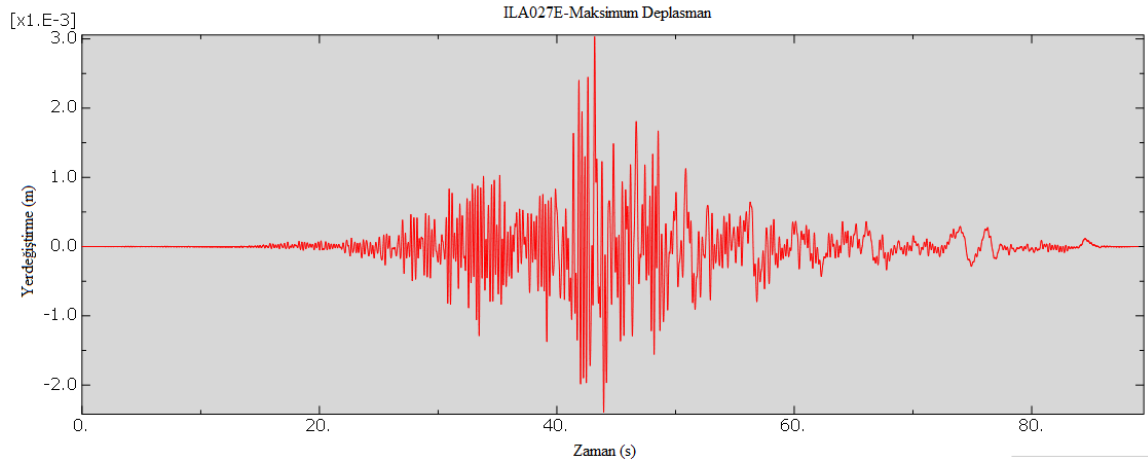


(b)

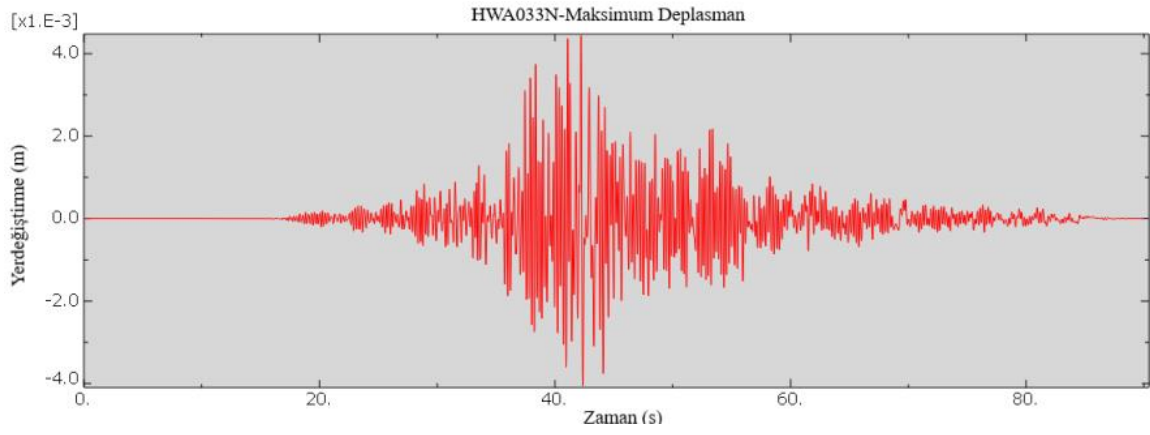


(c)

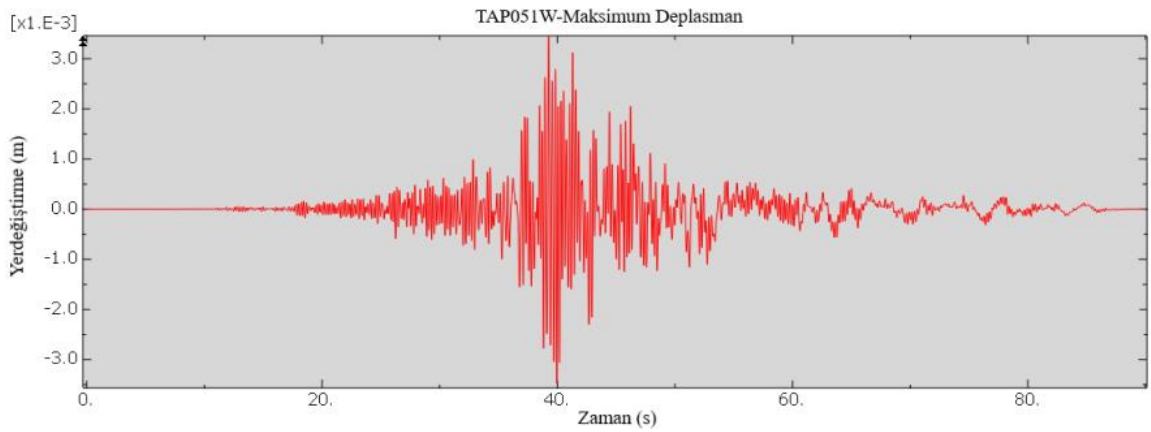
Şekil 4.15. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.16. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

## 4.2. Kobe Depremi

### 4.2.1. Yakın fay kayıtları

#### Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF)

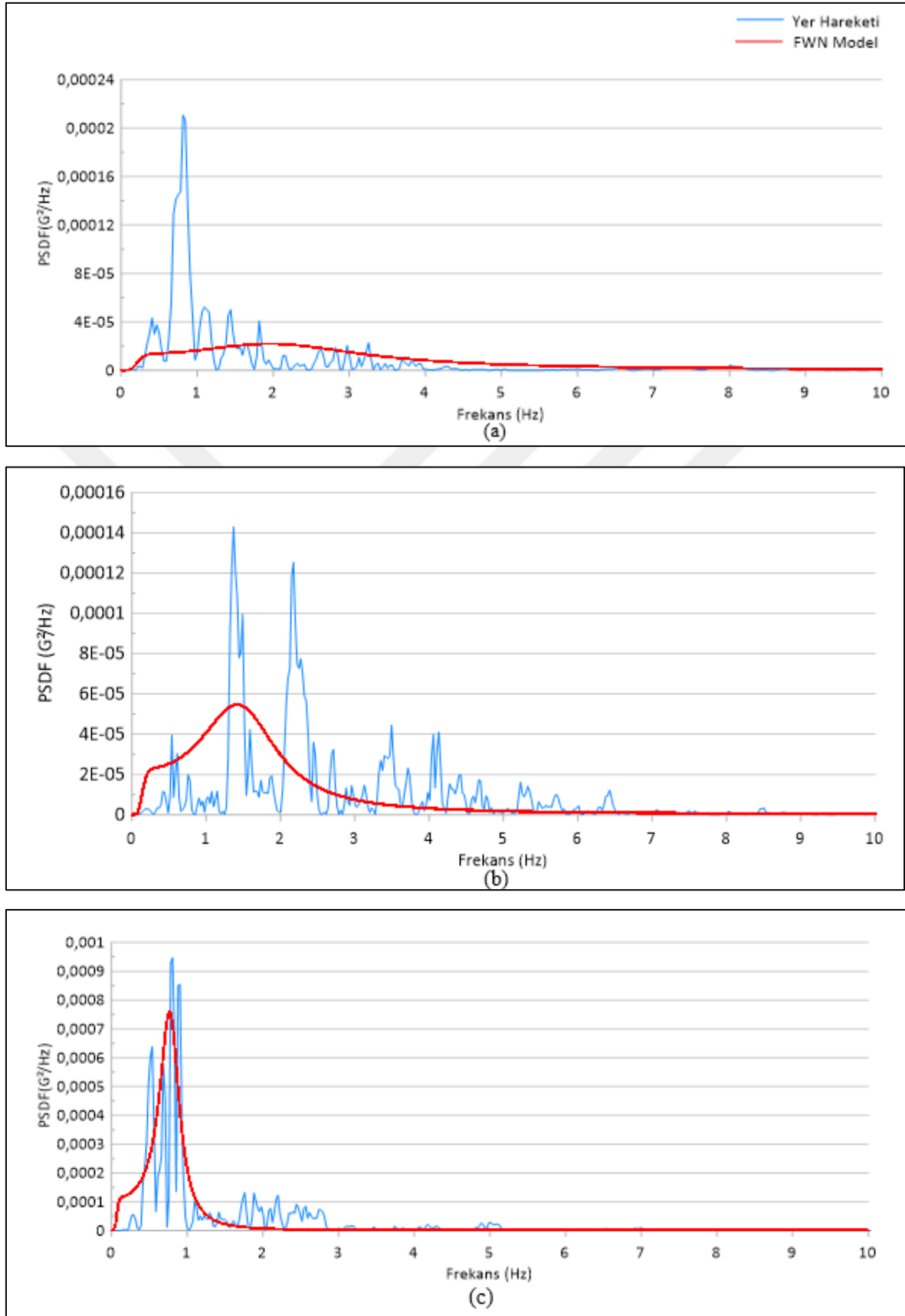
Kobe (1995) depremi zemin cinsinin yanı sıra fay etkisi için de incelendiğinden analiz sonuçları bu bölümde uzak ve yakın fay için ayrı ayrı gösterilmiştir. Yakın fay etkisini Kobe (1995) depremi için inceleyebilmek amacıyla sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen yer ivme hareketlerine karşılık gelen Takatori, Nishi-Akashi ve Kobe University istasyon kayıtları kullanılmıştır. Her bir zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli ve Kobe depremi yer hareketi için ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

Maksimum yer değiştirme ve gerilmeler rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz ile belirlenmiş ve Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

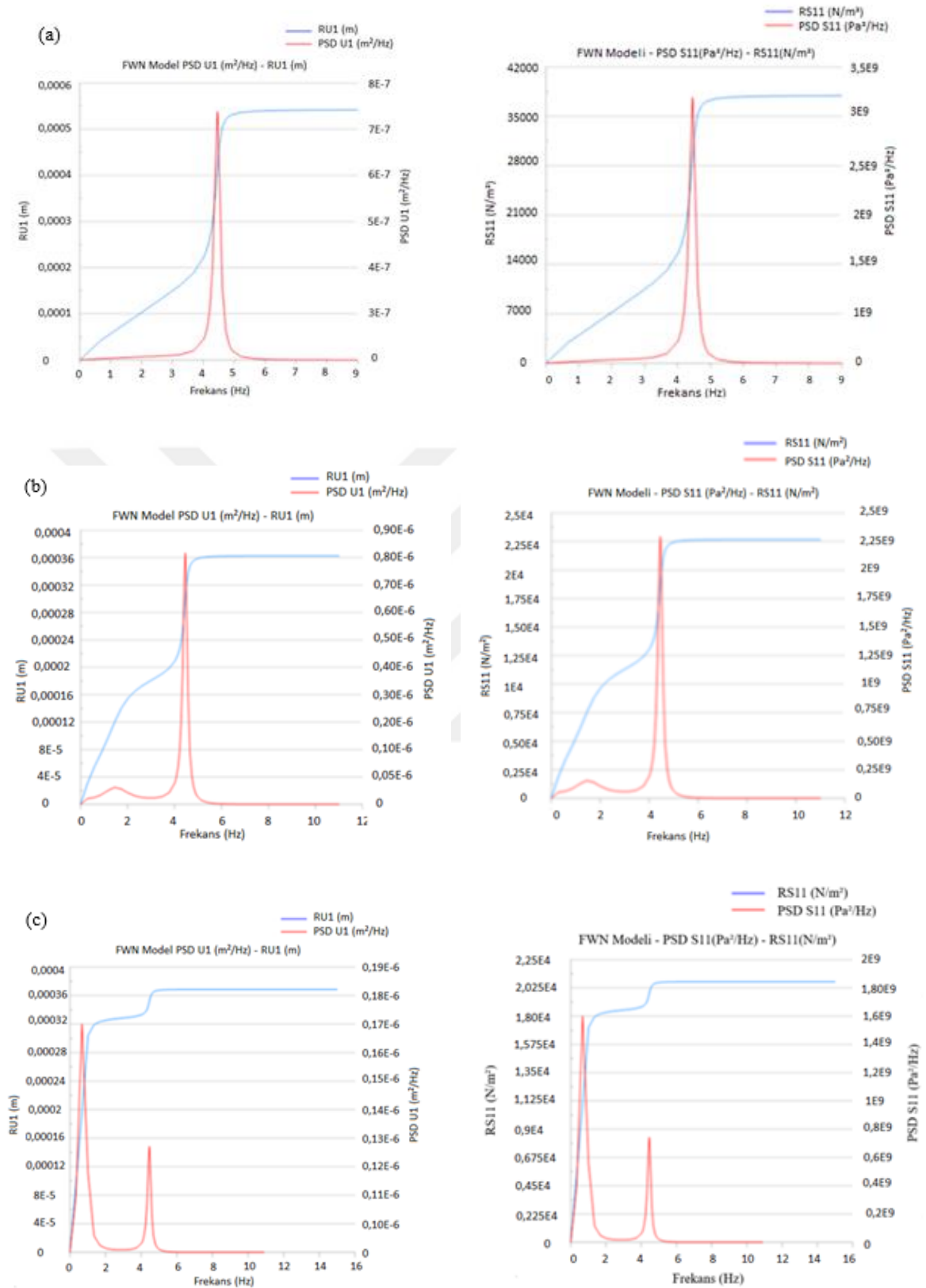
Çizelge 4.2. Analiz sonuçları

Yakın Fay							
Kobe		RU1 (m)	RV1 (m/s)	Maksimum			
				Ort. (mm)	U1 (mm)	RS11 (N/m <sup>2</sup> )	S11 (N/m <sup>2</sup> )
Fay Uzaklığı (km)	Gerçek Deprem						
0,92	Sert	2,67E-4	5,90E-3	0,82		1,58E+4	
7,08	Orta	6,60E-4	1,77E-2	2,08		4,32E+4	
1,47	Yumuşak	5,60E-4	1,30E-2	1,74		3,39E+4	
	Filtre Edilmiş Yer Hareketi						
0,92	Sert	5,40E-4	1,45E-2	1,70		3,57E+4	
7,08	Orta	3,63E-4	8,90E-3	1,13		2,26E+4	
1,47	Yumuşak	3,68E-4	4,96E-3	1,08		1,84E+4	
	Deterministik Analiz						
0,92	Sert				7,67		4,09E+5
7,08	Orta				23,04		1,15E+6
1,47	Yumuşak				22,86		1,16E+6

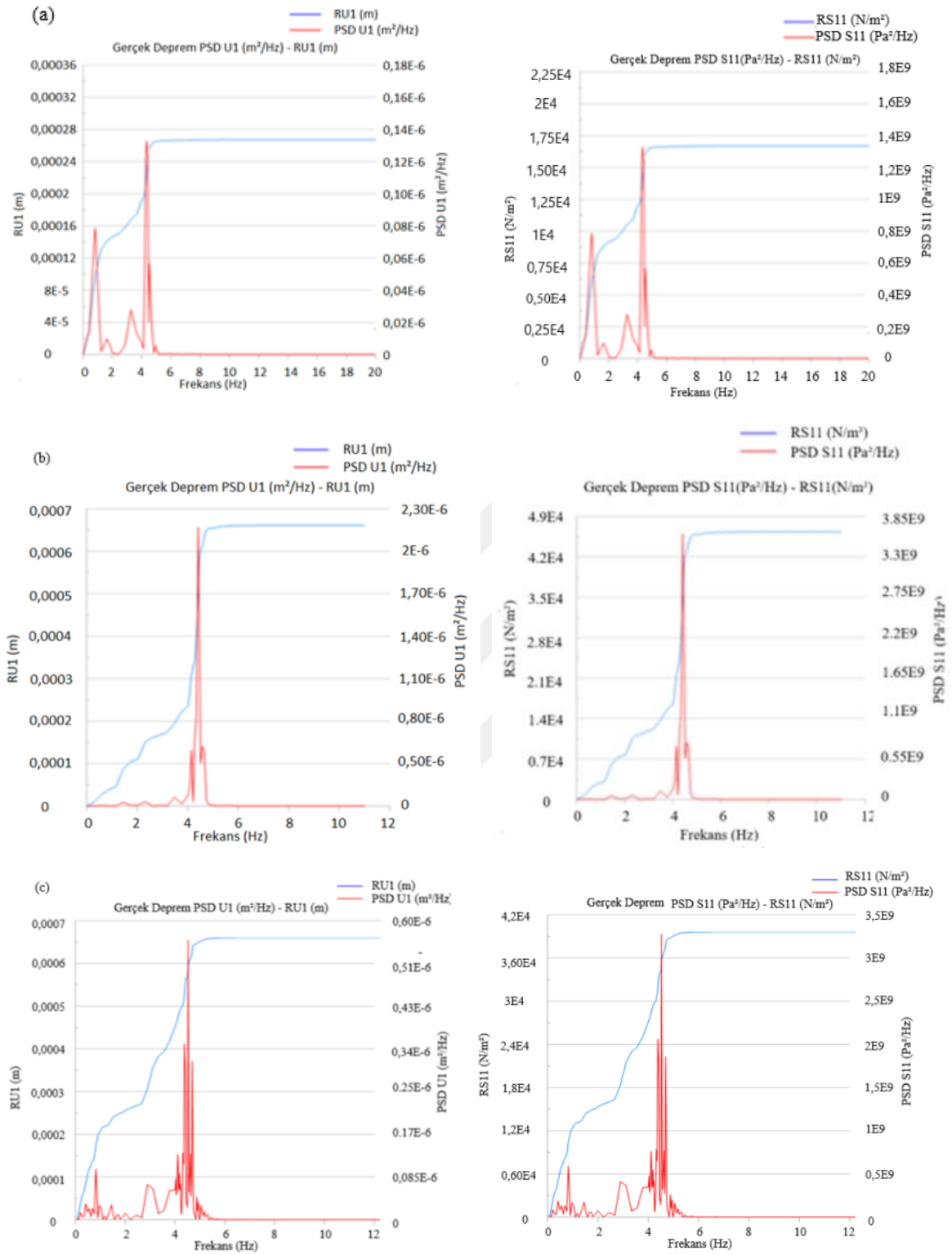
FEBG modeline ve gerçek deprem hareketine ait tepe noktasının PSD U1 (m<sup>2</sup>/Hz), RU1(m), PSD S11(Pa<sup>2</sup>/Hz) ve RS11(N/m<sup>2</sup>) değerleri grafik halinde sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 'da verilmiştir.



Şekil 4.17. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

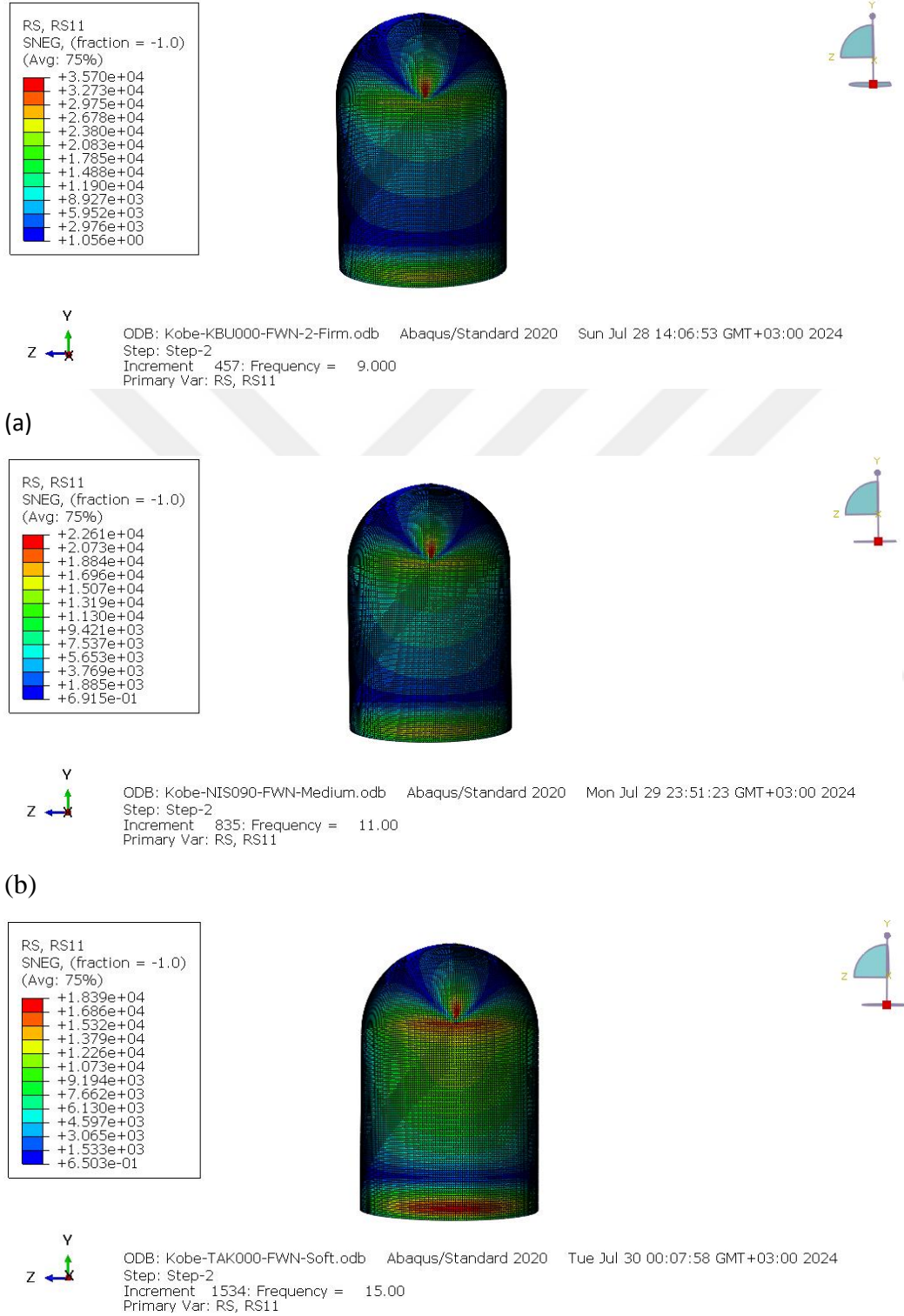


Şekil 4.18. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



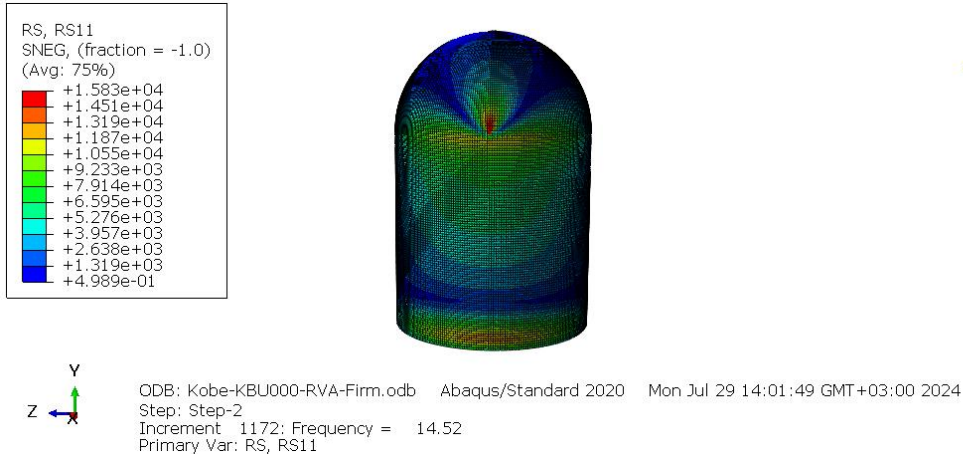
Şekil 4.19. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

FEBG ve gerçek deprem hareketlerinin kullanıldığı rastgele titreşim analizi ile belirlenen asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.

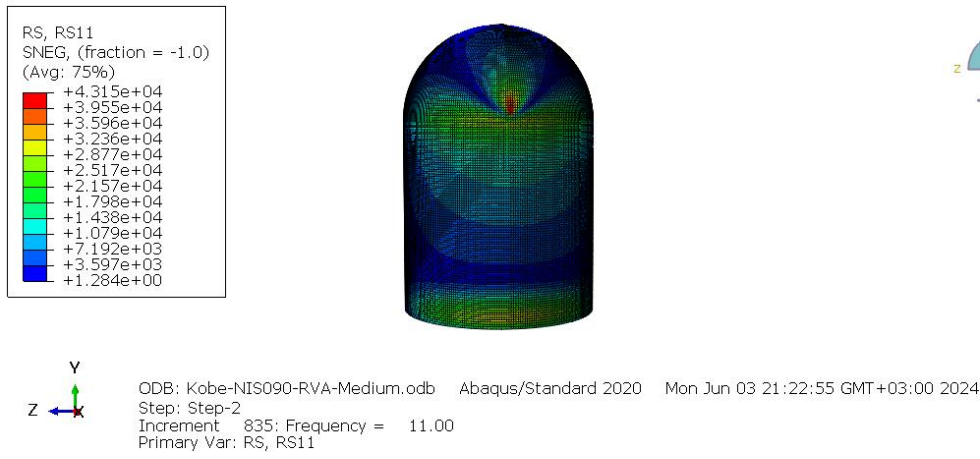


(c)

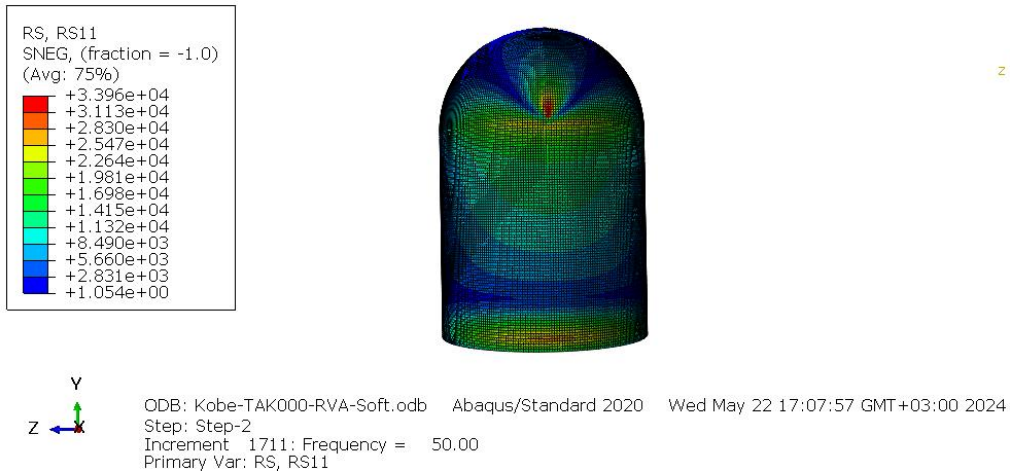
Şekil 4.20. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.21. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

### Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme

Bu bölümde FEBG modeli için elde edilen sonuçlar, yakın faya ait gerçek deprem hareketi için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak FEBG modelinin gerçek deprem hareketini ne ölçüde yansıttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.17'e bakıldığında FEBG modeli ve gerçek deprem ile oluşturulmuş güç spektral yoğunluk fonksiyonunun altında kalan alanların birbirine eşit olduğu görülmektedir.

Rastgele titreşim analizi sonucunda gerek gerçek yer hareketi gerekse de FEBG modeli için santral binası tepe noktasına ait yer değiştirme ve gerilme bileşenleri için PSD U1, PSD S11 (güç spektral yoğunluk fonksiyonu) ve RMS U1, RMS S11 (karesel ortalamanın karekökü) değerleri frekansa bağlı olarak belirlenmiş ve Şekil 4.18-4.19'da verilmiştir.

Chi-Chi depremi için de görüldüğü üzere dinamik tepkilere ait grafiklerde genel olarak tek bir tepe noktası gözükmemektedir ki bu durumda rezonansa işaret etmektedir. Bunun yanında FEBG modeli için elde edilen GSY ve KOK grafikleri incelenecek olursa sert zemin cinsi için yapı hakim frekansında (4,46 Hz) tek bir tepe noktası gözlenmektedir. Sert zemin cinsinde FEBG modeline ait GSY grafiğine bakılacak olursa, yapı hakim frekansını da içeren frekans bölgesi boyunca GSY grafiği değişim gösterdiğinden, yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde bir tepe noktası ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Orta zemin cinsi için elde edilen GSY grafiği incelenecek olursa en büyük tepe noktası yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde ortaya çıkmakla birlikte, Şekil 4.17' de görüldüğü gibi orta zemin cinsine ait GSY grafiği 1,3 Hz civarında bir tepe noktası içerdiğinden, yer değiştirme tepkisi için de (PSD U1) bu frekans bölgesinde küçük bir tepe noktası gözükmemektedir. Yumuşak zemin cinsi için elde edilen yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD U1) incelendiğinde ise sert ve orta zemin cinsleri için elde edilen değişimden farklı bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.17' de de görüleceği üzere yumuşak zemin cinsine ait FEBG modeli GSY grafiğinde 0,8 Hz bölgesinde, dar bir frekans bölgesi boyunca belirgin bir tepe noktası olduğundan, PSD U1 grafiğinde de bu bölgede bir tepe noktası gözlenmektedir. Bunun yanında yine yapı hakim frekans bölgesinde ikinci bir küçük tepe noktası ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla sonuçlar üzerinde, gerek dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin gerekse de yapı sisteminin hakim frekansının etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da görüldüğü gibi gerçek yer hareketi ve FEBG yer hareketi modeli için elde edilen tepki değerleri karşılaştırıldığında, sert zemin cinsi için FEBG modelinin, orta ve yumuşak zemin cinsi için ise gerçek yer hareketi modelinin daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum gerçek ve FEBG modeli için çizilen GSY grafiklerine bakılarak anlaşılabilir (Şekil 4.17). Şekillerden görüleceği üzere santral binası hakim frekansına  $f=4,46\text{Hz}$  karşılık gelen GSY değerleri, sert zeminde FEBG modeli için, orta ve yumuşak zemin durumunda ise gerçek yer hareketi modeli için daha büyüktür. Yapı hakim frekans bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir.

#### Zemin cinsine göre değerlendirme

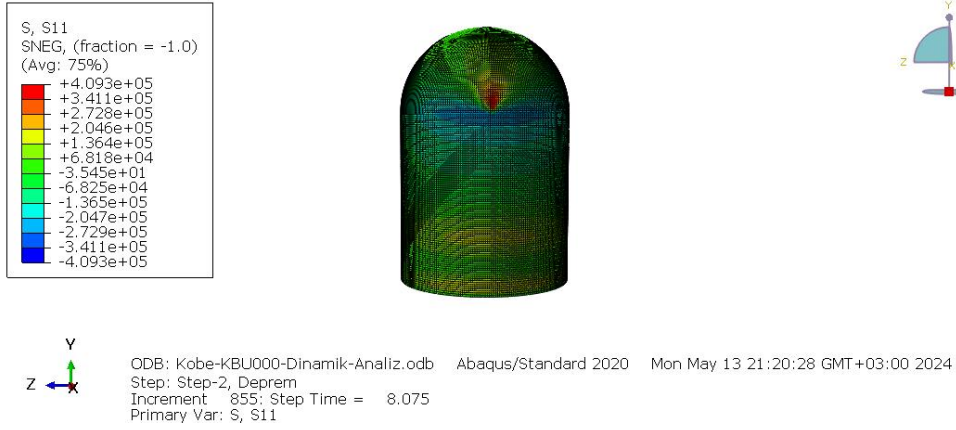
Çizelge 4.2' den görüleceği üzere gerek rastgele titreşim analizinde, gerekse de deterministik dinamik analizde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen tepkiler düzenli bir değişim göstermemektedir.

Deterministik dinamik analizde en büyük yer değiştirme ve gerilmeler orta zemin cinsi için elde edilirken, en küçük tepkiler sert zemin cinsi için elde edilmiştir. Aynı değişim, gerçek yer hareketine ait GSY grafiğinin kullanıldığı rastgele titreşim analizinde ortaya çıkmıştır. FEBG modeli kullanılarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analizinde ise maksimum tepkiler sert zemin durumunda ortaya çıkarken, en küçük tepkiler yumuşak zemin cinsi için elde edilmiştir (Çizelge 4.2). Bu durum yine yer değiştirme güç spektral yoğunluk fonksiyonuna (PSD U1) bakılarak anlaşılabilir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da görüleceği üzere santral binası hâkim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük GSY genliğine sahip olan zemin durumları için daha büyük tepkiler elde edilmiştir. Bu durumda zemin cinsinin farklılığından ziyade, yer hareketine ait GSY frekans içeriği ile yapı hâkim frekans arasındaki ilişkinin tepki değerlerinin daha büyük ve daha küçük olmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

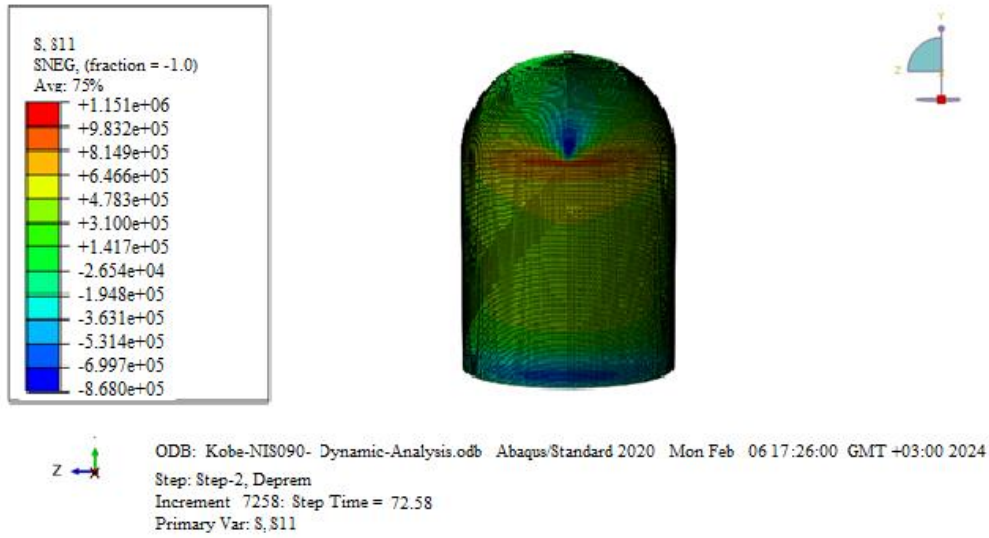
### Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme

Rastgele titreşim analizleri ve deterministik analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme sonuçları kıyaslandığında, deterministik analiz sonucunda elde edilen tepkilerin beklenildiği gibi belirgin bir şekilde daha büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.2, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23).

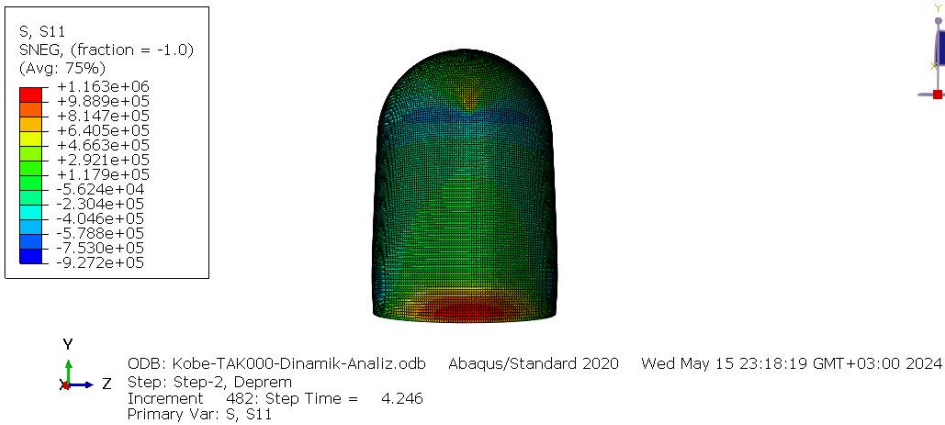
Kobe deprem kayıtları kullanılarak yapılan gerçek yer hareketinin dikkate alındığı rastgele titreşim analizi ve deterministik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, Kobe depreminde orta sınıflı zeminde en büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görülürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme sert zeminde ortaya çıkmıştır.



(a)

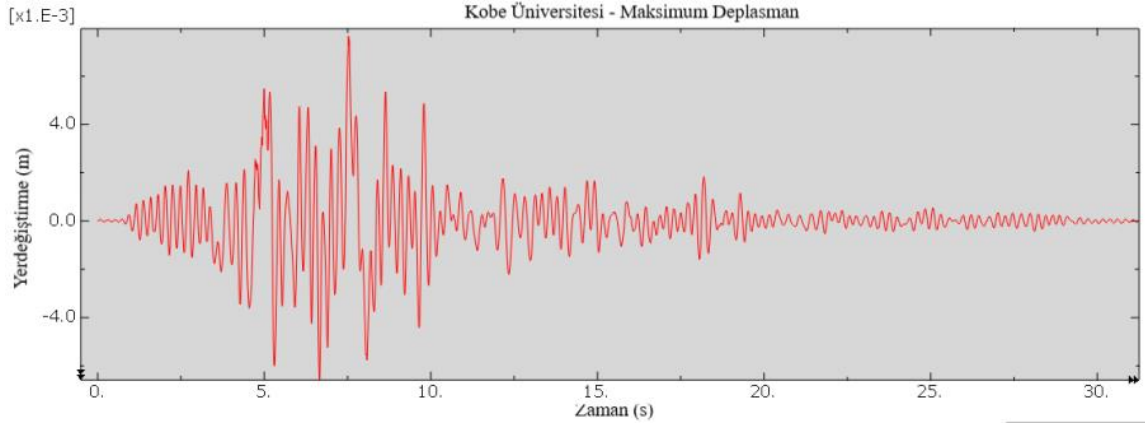


(b)

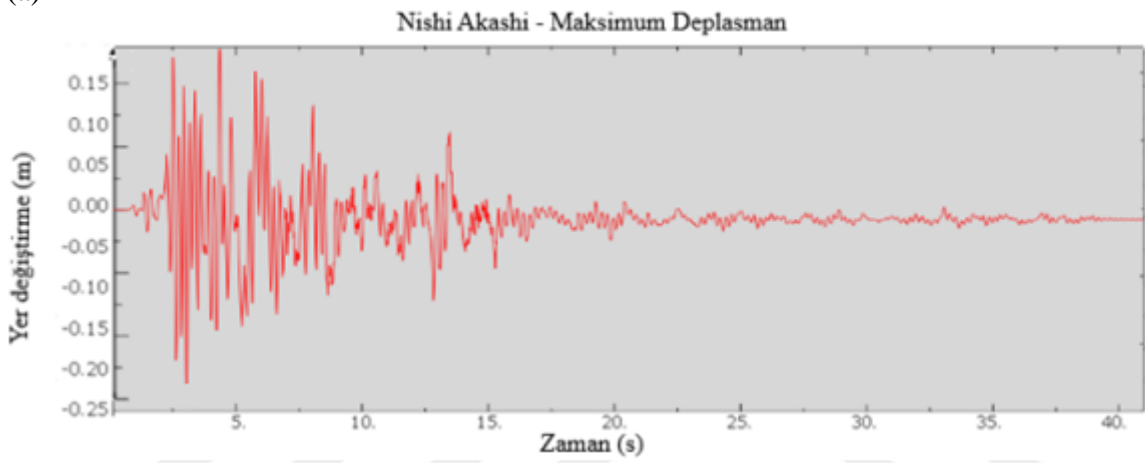


(c)

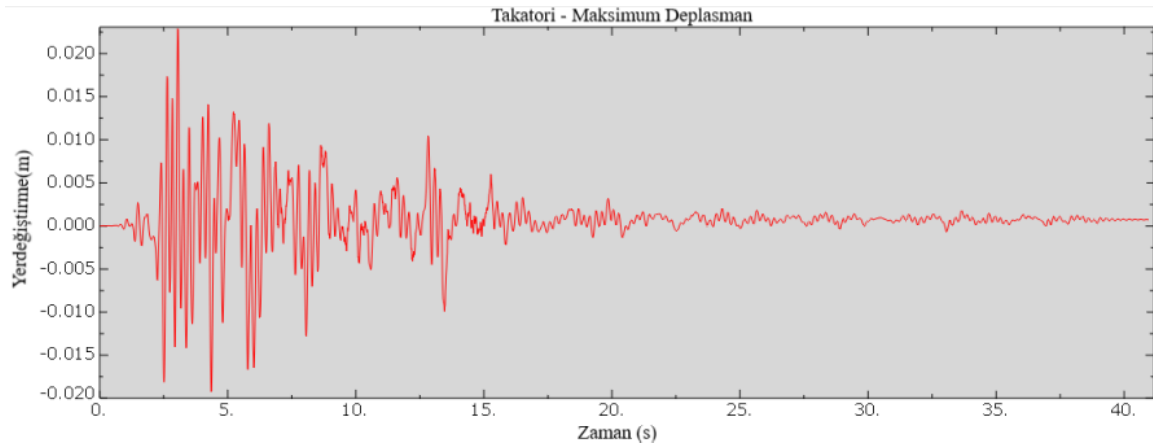
Şekil 4.22. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.23. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

#### 4.2.2. Uzak fay kayıtları

##### Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF)

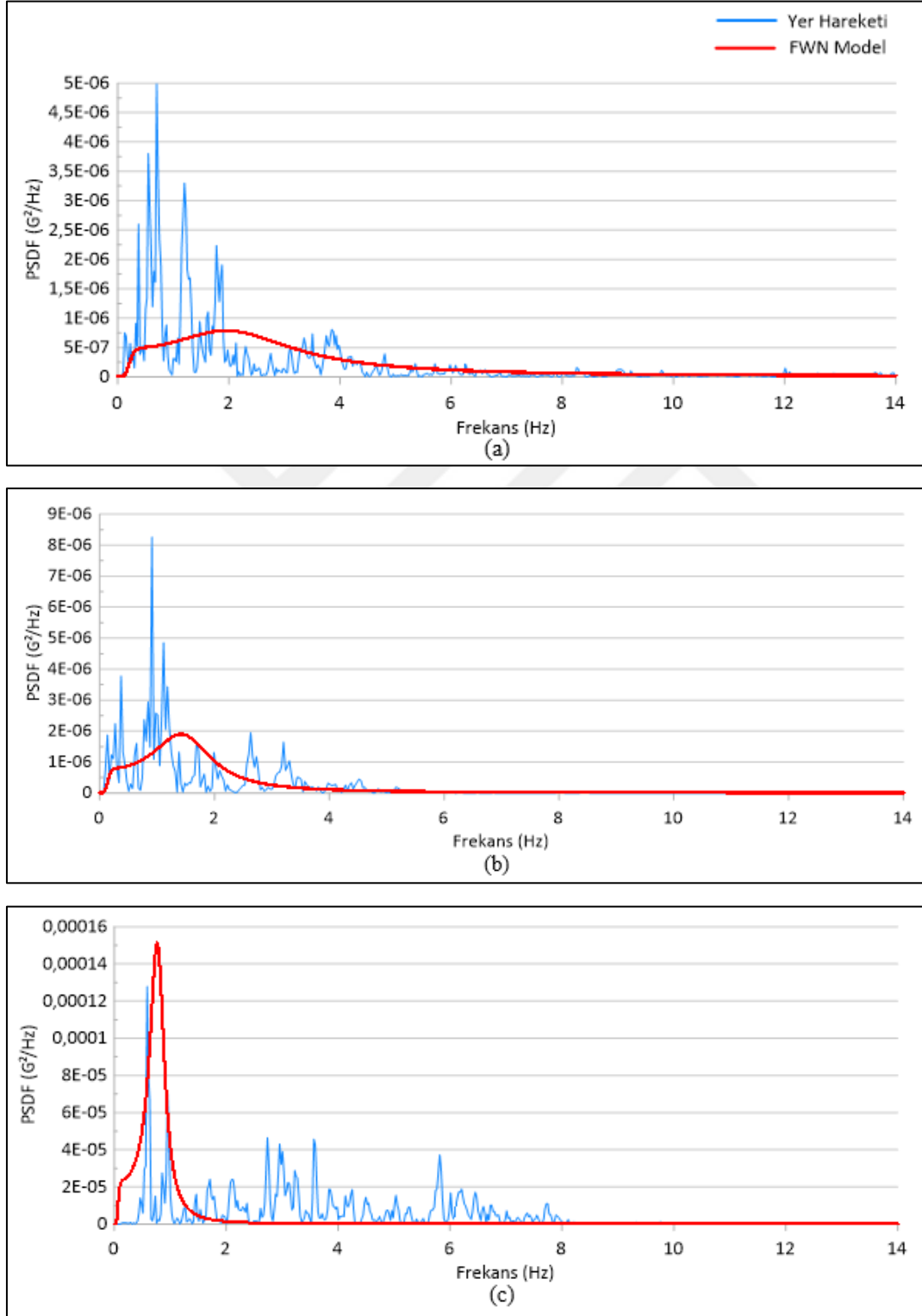
Uzak fay etkisini Kobe (1995) depremi için inceleyebilmek amacıyla sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen yer ivme hareketlerine karşılık gelen Kakogawa, Berkeley - Strawberry Canyon ve SF-Rincon Hill istasyon kayıtları kullanılmıştır. Her bir zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli ve Kobe depremi yer hareketi için ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

Maksimum yer değiştirme ve gerilmeler rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz ile belirlenmiş ve Çizelge 4.3’ de verilmiştir.

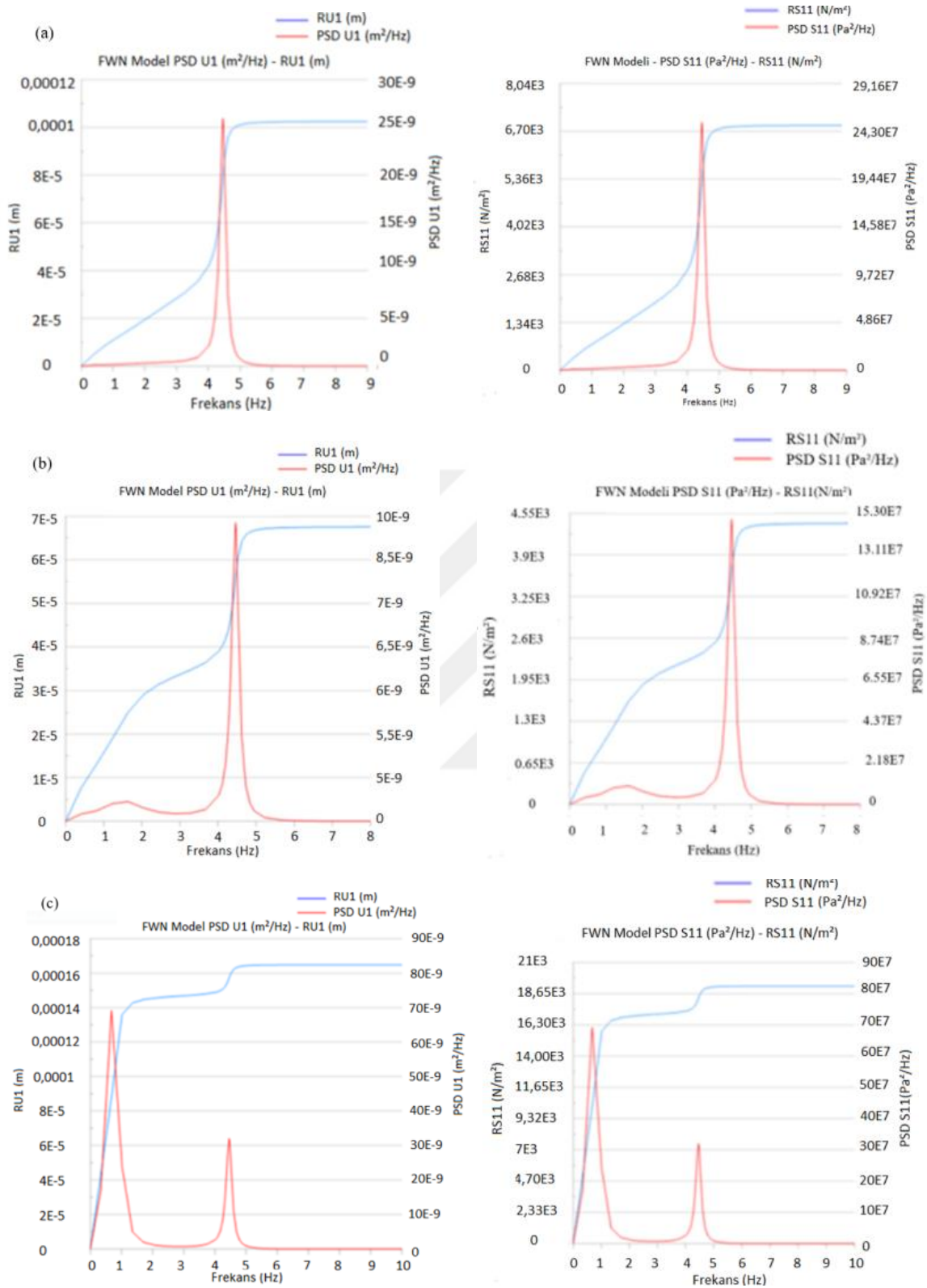
Çizelge 4.3. Analiz sonuçları

Uzak Fay							
Kobe		RU1 (m)	RV1 (m/s)	Maksimum			
				Ort. (mm)	U1 (mm)	RS11 (N/m <sup>2</sup> )	S11 (N/m <sup>2</sup> )
Fay Uzaklığı (km)	Gerçek Deprem						
74,14	Sert	7,90E-5	2,00E-3	0,24		5,00E+3	
78,41	Orta	1,00E-4	2,65E-3	0,31		6,50E+3	
22,50	Yumuşak	5,26E-4	1,44E-2	1,66		3,40E+4	
	Filtre Edilmiş Yer Hareketi						
74,14	Sert	1,03E-4	2,75E-3	0,32		6,72E+3	
78,41	Orta	6,75E-5	1,65E-3	0,21		4,20E+3	
22,50	Yumuşak	1,65E-4	2,22E-3	0,48		8,15E+3	
	Deterministik Analiz						
74,14	Sert				2,53		1,61E+5
78,41	Orta				2,97		1,77E+5
22,50	Yumuşak				15,55		9,86E+5

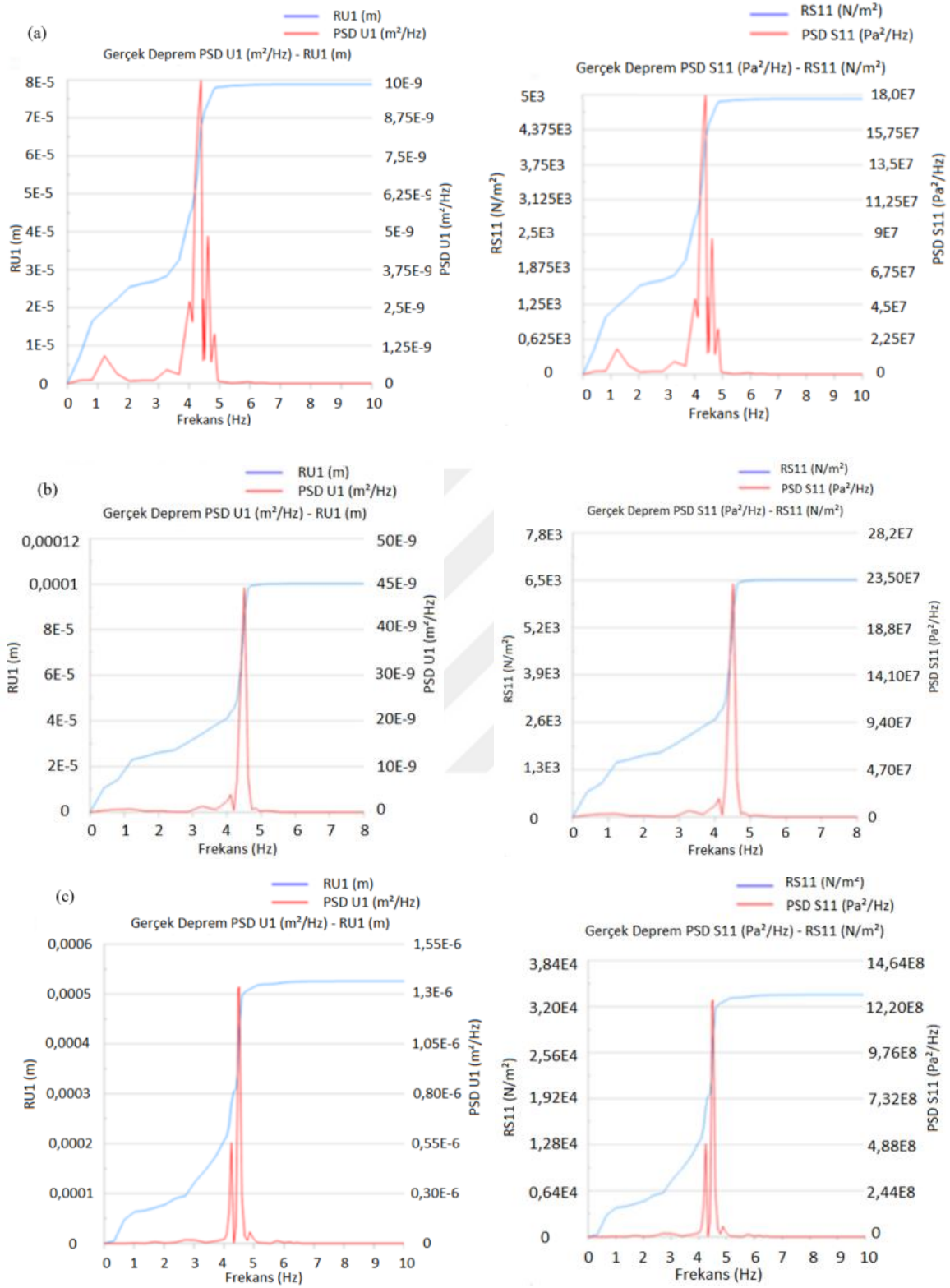
FEBG modeline ve gerçek deprem hareketine ait tepe noktasının PSD U1 ( $m^2/Hz$ ), RU1(m), PSD S11( $Pa^2/Hz$ ) ve RS11( $N/m^2$ ) değerleri grafik halinde Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 'da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.24. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

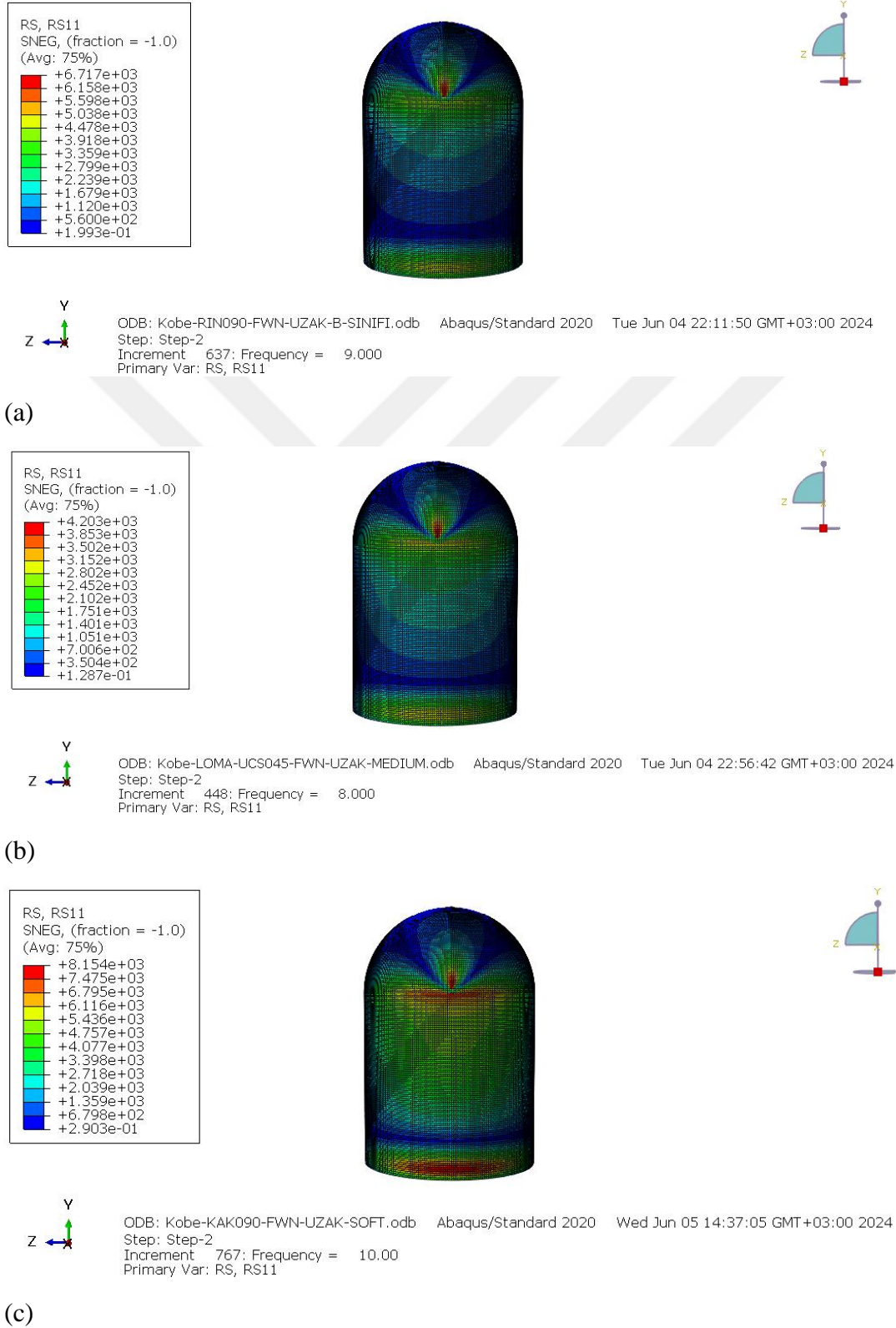


Şekil 4.25. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

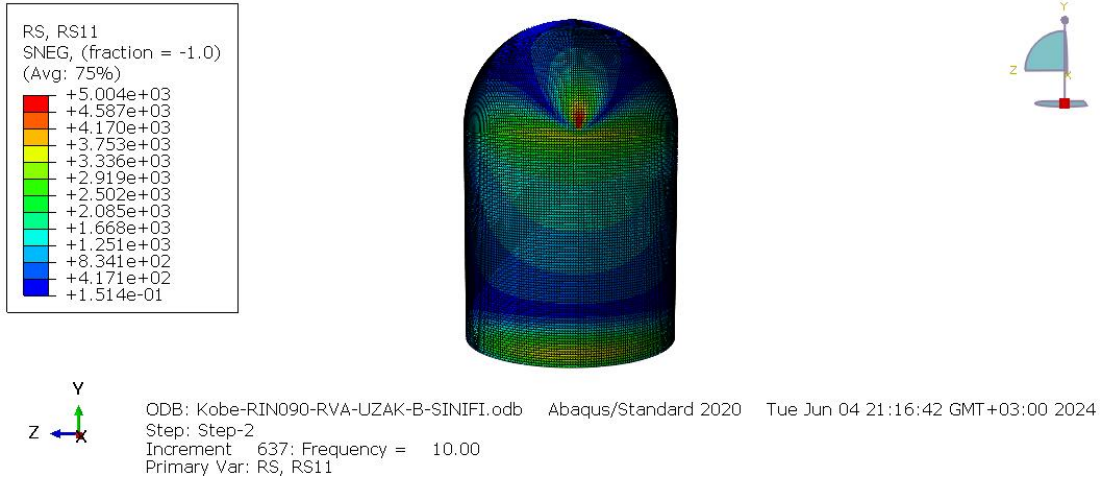


Şekil 4.26. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değıştirme ve gerilme değeri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

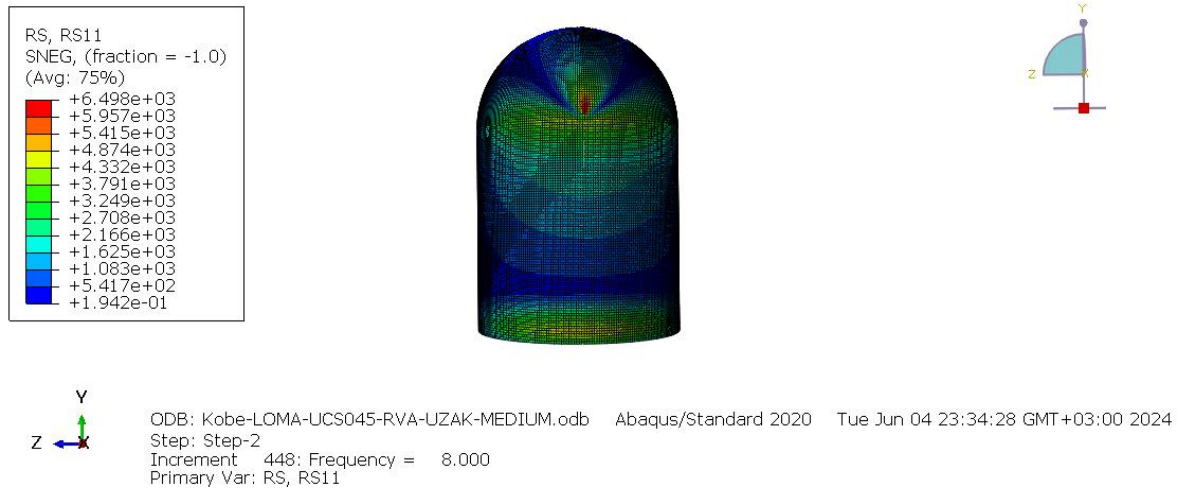
FEBG ve gerçek deprem hareketlerinin kullanıldığı rastgele titreşim analizi ile belirlenen asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



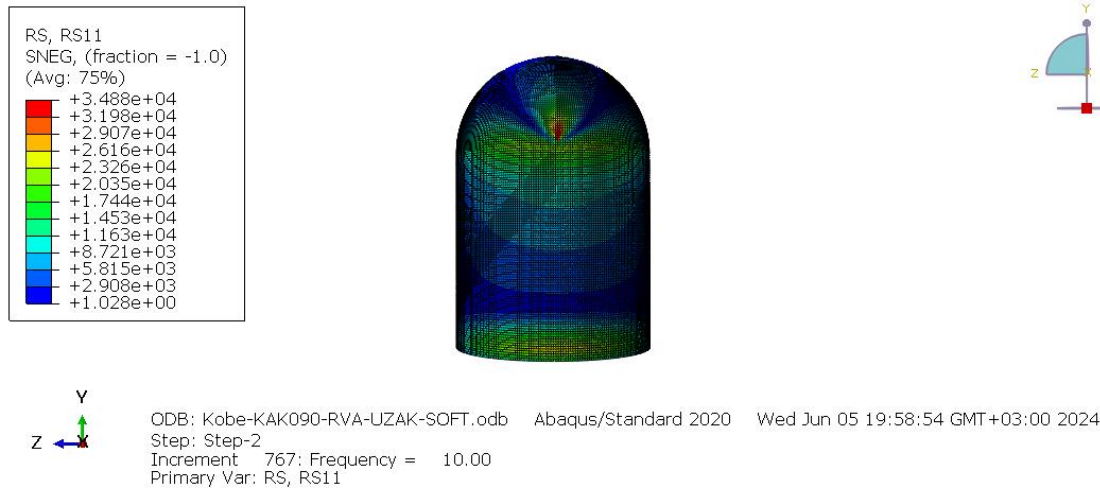
Şekil 4.27. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.28. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

### Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme

Rastgele titreşim analizi sonucunda gerek gerçek yer hareketi gerekse de FEBG modeli için santral binası tepe noktasına ait yer değiştirme ve gerilme bileşenleri için PSD U1, PSD S11 (güç spektral yoğunluk fonksiyonu) ve RMS U1, RMS S11 (karesel ortalamanın karekökü) değerleri frekansa bağlı olarak belirlenmiş ve Şekil 4.25-4.26'da verilmiştir.

Yakın fay kayıtları için gözleendiği gibi uzak fay kayıtları için de dinamik tepkilere ait grafiklerde genel olarak tek bir tepe noktası gözükmemektedir ki bu durumda rezonansa işaret etmektedir. Bunun yanında FEBG modeli için elde edilen GSY ve KOK grafikleri incelenecek olursa burada da sert zemin cinsi için yapı hakim frekansında (4,46 Hz) tek bir tepe noktası gözlenmektedir. Sert zemin cinsinde FEBG modeline ait GSY grafiğine bakılacak olursa, yapı hakim frekansını da içeren frekans bölgesi boyunca GSY grafiği değişim gösterdiğinden, yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde bir tepe noktası ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Orta zemin cinsi için elde edilen GSY grafiği incelenecek olursa en büyük tepe noktası yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde ortaya çıkmakla birlikte, Şekil 4.24'de görüldüğü gibi orta zemin cinsine ait GSY grafiği 1,5 Hz civarında bir tepe noktası içerdiğinden, yer değiştirme tepkisi için de (PSD U1) bu frekans bölgesinde küçük bir tepe noktası gözükmemektedir. Yumuşak zemin cinsi için elde edilen yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD U1) incelendiğinde ise sert ve orta zemin cinsleri için elde edilen değişimden farklı bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.24'de de görüleceği üzere yumuşak zemin cinsine ait FEBG modeli GSY grafiğinde 0,9 Hz bölgesinde, dar bir frekans bölgesi boyunca belirgin bir tepe noktası olduğundan, PSD U1 grafiğinde de bu bölgede bir tepe noktası gözlenmektedir. Bunun yanında yine yapı hakim frekans bölgesinde ikinci bir küçük tepe noktası ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla sonuçlar üzerinde, gerek dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin gerekse de yapı sisteminin hakim frekansının etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da görüldüğü gibi gerçek yer hareketi ve FEBG yer hareketi modeli için elde edilen tepki değerleri karşılaştırıldığında, sert zemin cinsi için FEBG modelinin, orta ve yumuşak zemin cinsi için ise gerçek yer hareketi modelinin daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum gerçek ve FEBG modeli için çizilen GSY grafiklerine bakılarak anlaşılabilir (Şekil 4.24). Şekillerden görüleceği üzere santral binası hakim frekansına  $f=4,46\text{Hz}$  karşılık gelen GSY değerleri, sert zeminde FEBG modeli için,

orta ve yumuşak zemin durumunda ise gerçek yer hareketi modeli için daha büyüktür. Yapı hakim frekansı bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir.

### Zemin cinsine göre değerlendirme

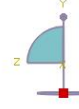
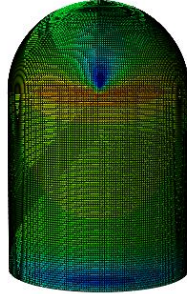
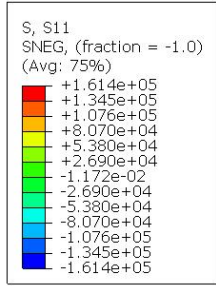
Çizelge 4.3'den görüleceği üzere gerek rastgele titreşim analizinde, gerekse de deterministik dinamik analizde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen tepkiler düzenli bir değişim göstermemektedir.

Deterministik dinamik analizde en büyük yer değiştirme ve gerilmeler yumuşak zemin cinsi için elde edilirken, en küçük tepkiler sert zemin cinsi için elde edilmiştir. Aynı değişim, gerçek yer hareketine ait GSY grafiğinin kullanıldığı rastgele titreşim analizinde ortaya çıkmıştır. FEBG modeli kullanılarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analizinde ise maksimum tepkiler yumuşak zemin durumunda ortaya çıkarken, en küçük tepkiler orta sınıflı zemin cinsi için elde edilmiştir (Çizelge 4.3). Bu durum yine yer değiştirme güç spektral yoğunluk fonksiyonuna (PSD U1) bakılarak anlaşılabilir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da görüleceği üzere santral binası hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük GSY genliğine sahip olan zemin durumları için daha büyük tepkiler elde edilmiştir. Bu durumda zemin cinsinin farklılığından ziyade, yer hareketine ait GSY frekans içeriği ile yapı hakim frekansı arasındaki ilişkinin tepki değerlerinin daha büyük ve daha küçük olmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

### Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme

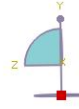
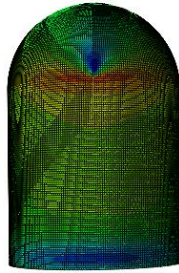
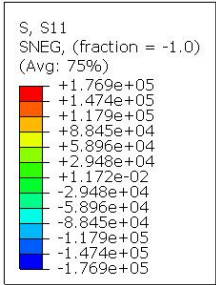
Rastgele titreşim analizleri ve deterministik analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme sonuçları kıyaslandığında, deterministik analiz sonucunda elde edilen tepkilerin beklenildiği gibi daha büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.4, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30). Uzak fay deprem kayıtları kullanılarak yapılan, gerçek yer hareketinin dikkate alındığı rastgele titreşim analizi ve deterministik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, yumuşak zeminde en

büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görölürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme sert zeminde gözlenmiştir.



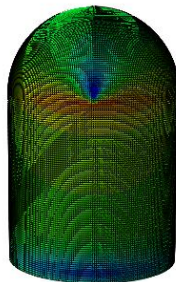
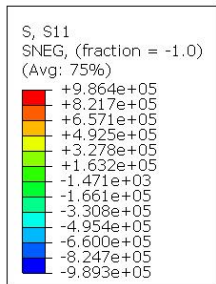
ODB: KOBE-RIN090-UZAK-Dinamik-Analiz.odb Abaqus/Standard 2020 Sat Jun 08 20:32:13 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment 1260: Step Time = 12.60  
Primary Var: S, S11

(a)



ODB: Kobe-Loma-UCS045-Dynamic-Analysis.odb Abaqus/Standard 2020 Tue Jun 18 00:19:08 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment 1049: Step Time = 10.49  
Primary Var: S, S11

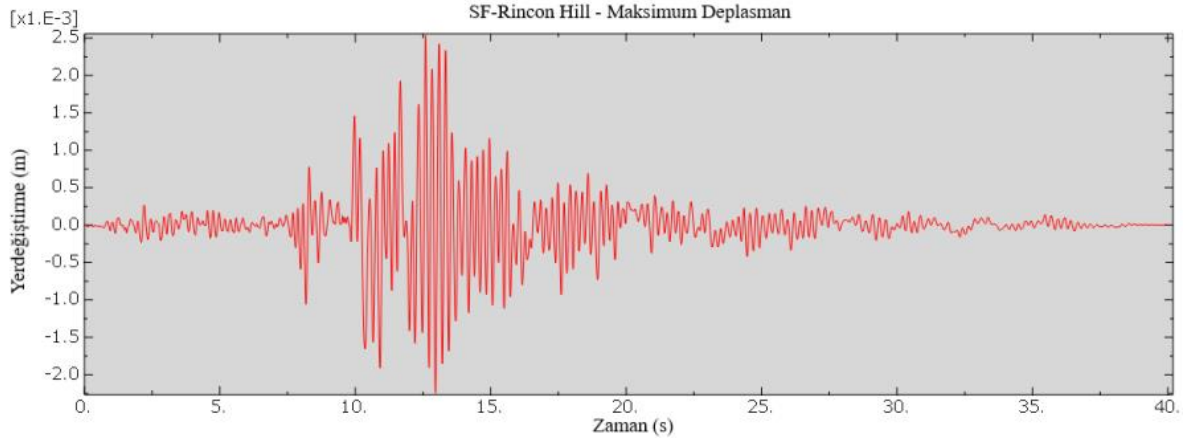
(b)



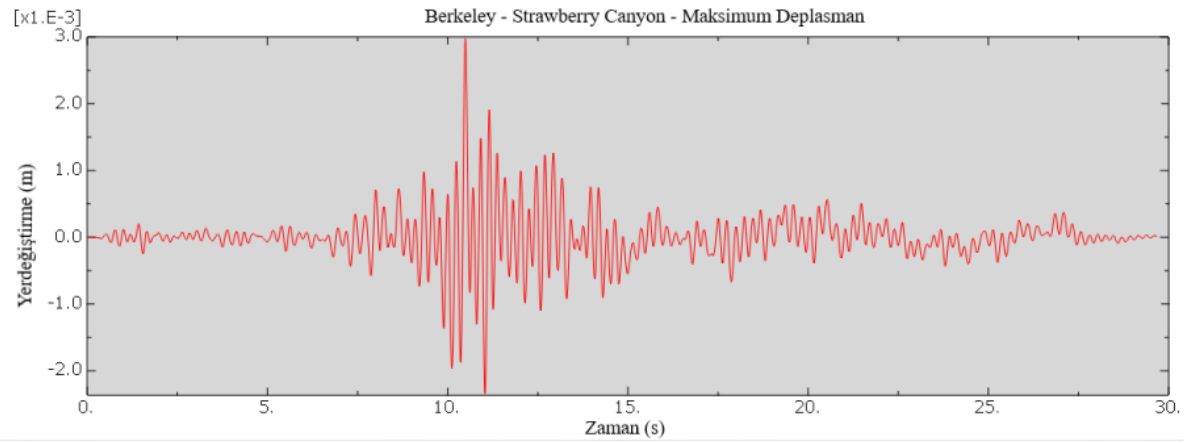
ODB: Kobe-KAK090-UZAK-Dinamik-Analiz.odb Abaqus/Standard 2020 Fri Jun 07 00:23:09 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment 717: Step Time = 7.170  
Primary Var: S, S11

(c)

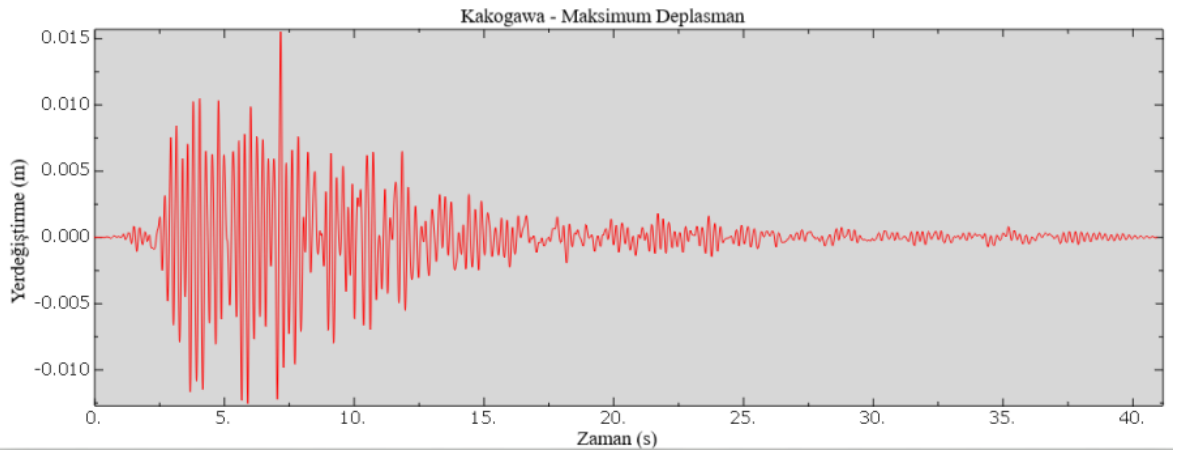
şekil 4.29. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.30. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

### 4.3. Kocaeli Depremi

#### 4.3.1. Yakın fay kayıtları

##### Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF)

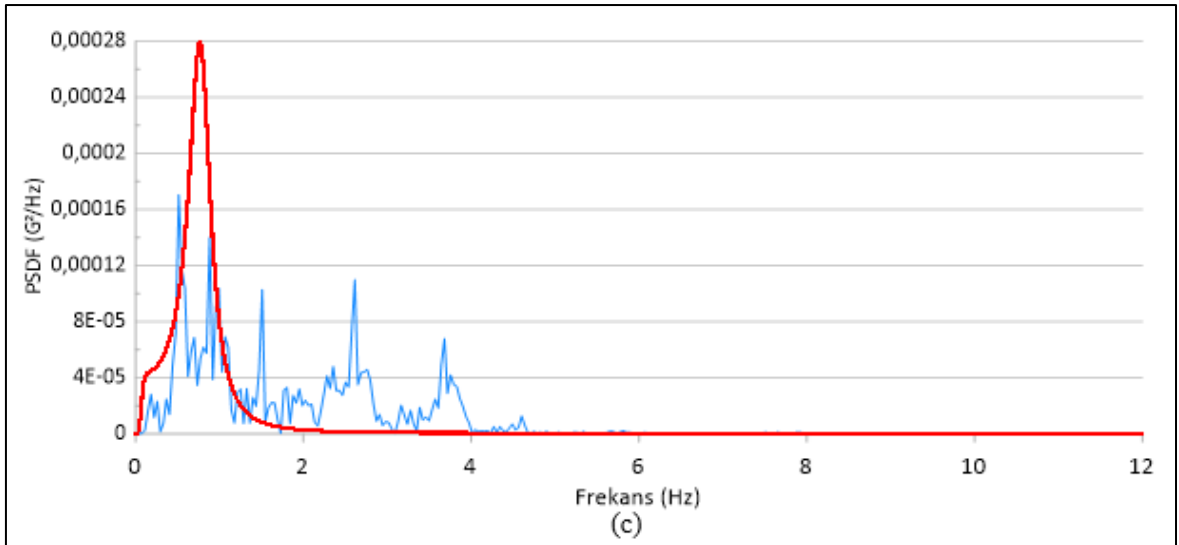
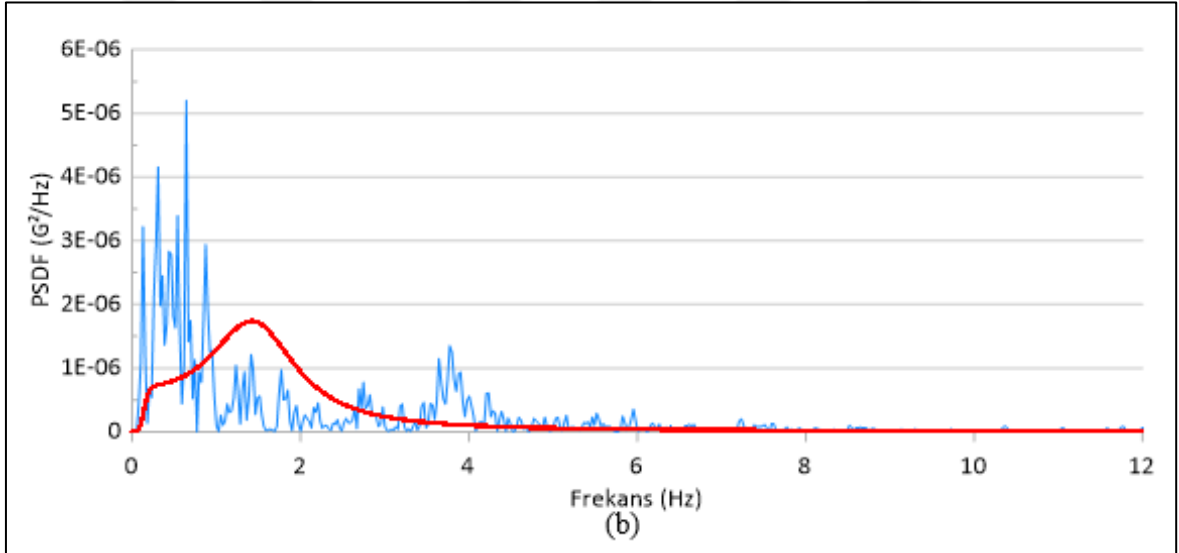
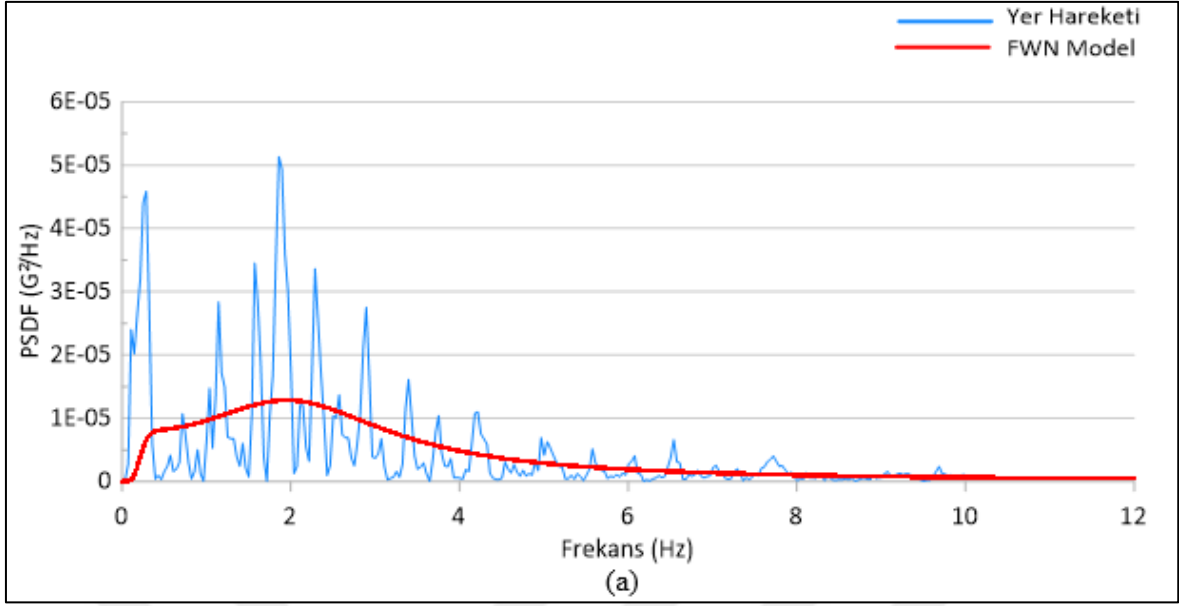
Kocaeli (1999) depremi zemin cinsinin yanı sıra fay etkisi için de incelendiğinden analiz sonuçları bu bölümde uzak ve yakın fay için ayrı ayrı gösterilmiştir. Yakın fay etkisini Kocaeli (1999) depremi için inceleyebilmek amacıyla sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen yer ivme hareketlerine karşılık gelen Düzce, Lamont 1058 ve Gebze istasyon kayıtları kullanılmıştır. Her bir zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli ve Kocaeli depremi yer hareketi için ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

Maksimum yer değiştirme ve gerilmeler rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz ile belirlenmiş ve Çizelge 4.4’ de verilmiştir.

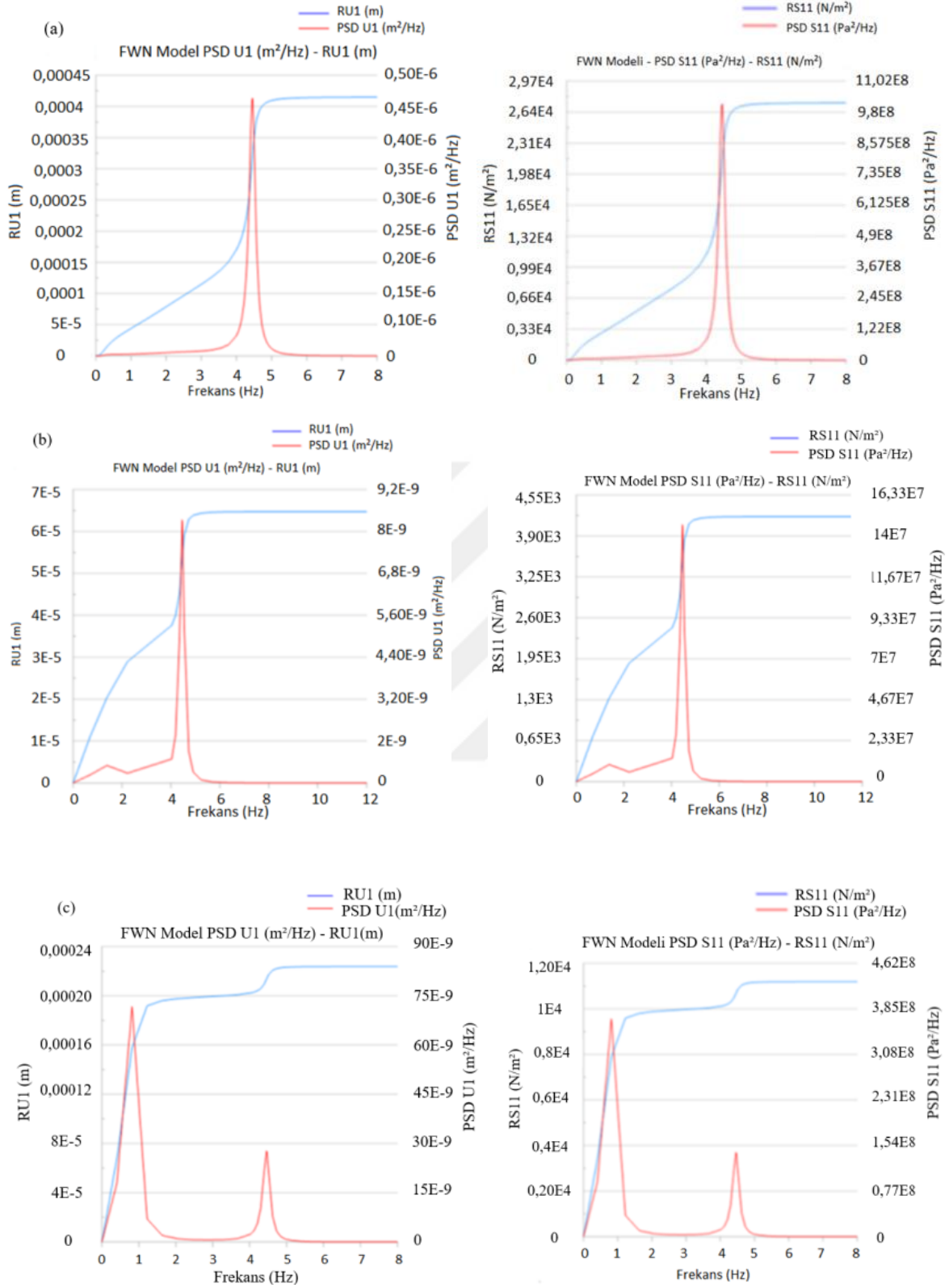
Çizelge 4.4. Analiz sonuçları

Yakın Fay							
Kocaeli		RU1 (m)	RV1 (m/s)	Maksimum			
				Ort. (mm)	U1 (mm)	RS11 (N/m <sup>2</sup> )	S11 (N/m <sup>2</sup> )
Fay Uzaklığı (km)	Gerçek Deprem						
10,92	Sert	3,30E-4	8,50E-3	1,04		2,14E+4	
0,21	Orta	8,00E-5	2,20E-3	0,27		5,60E+3	
15,37	Yumuşak	4,50E-4	1,12E-2	1,41		2,81E+4	
	Filtre Edilmiş Yer Hareketi						
10,92	Sert	4,15E-4	1,11E-2	1,31		2,72E+4	
0,21	Orta	6,50E-5	1,59E-3	0,20		4,04E+3	
15,37	Yumuşak	2,24E-4	3,00E-3	0,65		1,11E+4	
	Deterministik Analiz						
10,92	Sert				7,50		4,16E+5
0,21	Orta				2,71		1,50E+5
15,37	Yumuşak				11,03		6,27E+5

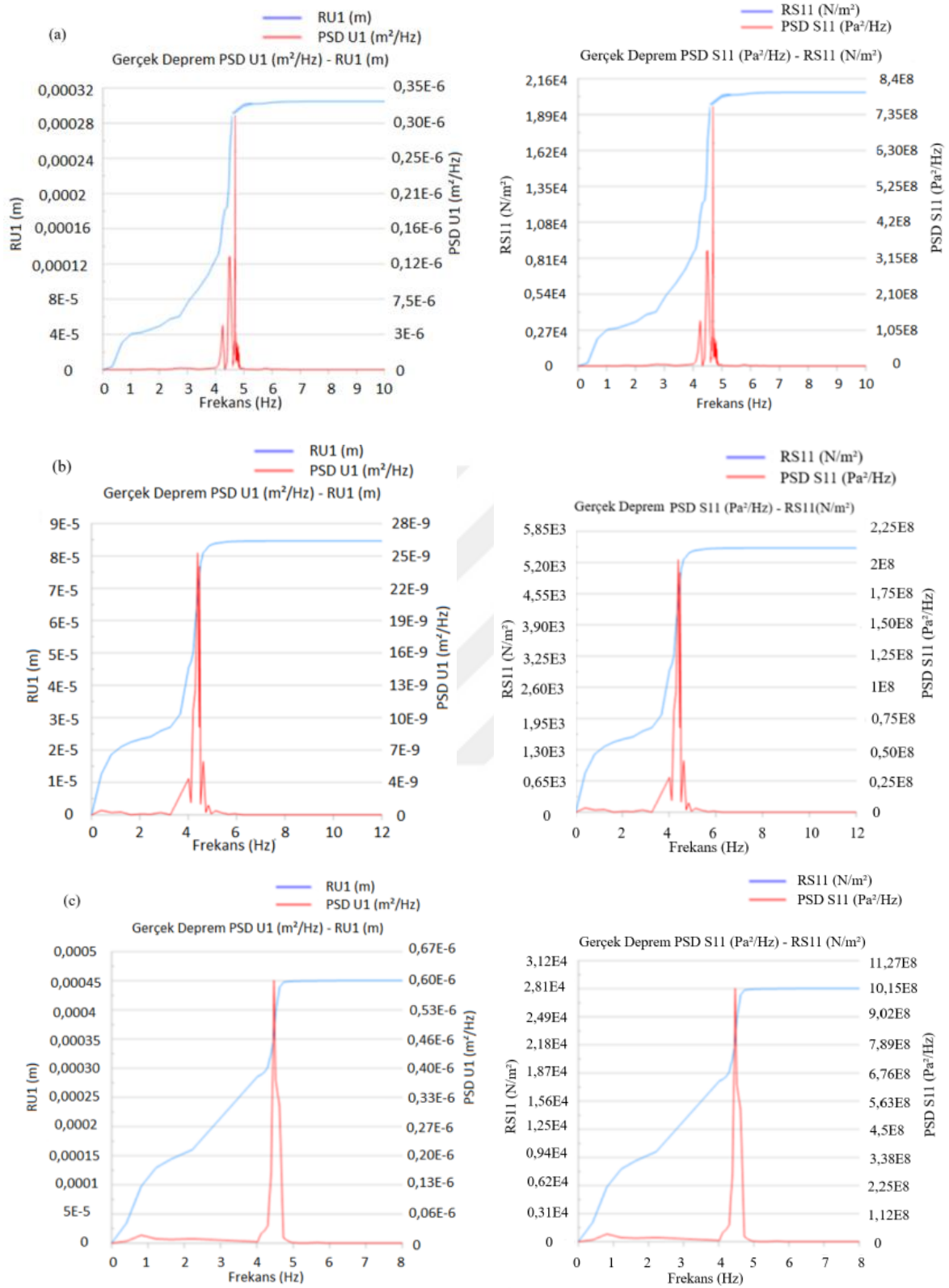
FEBG modeline ve gerçek deprem hareketine ait tepe noktasının PSD U1 (m<sup>2</sup>/Hz), RU1(m), PSD S11(Pa<sup>2</sup>/Hz) ve RS11(N/m<sup>2</sup>) değerleri grafik halinde Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 'da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.31. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

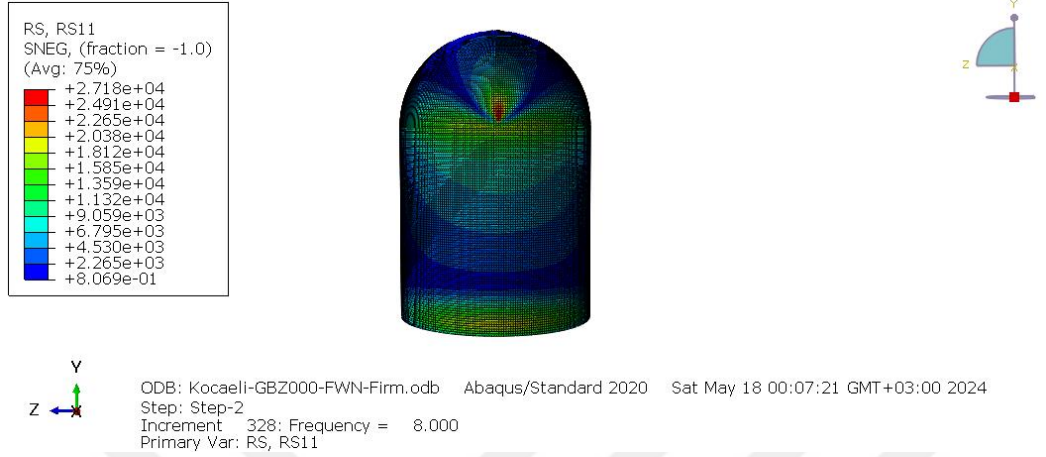


Şekil 4.32. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

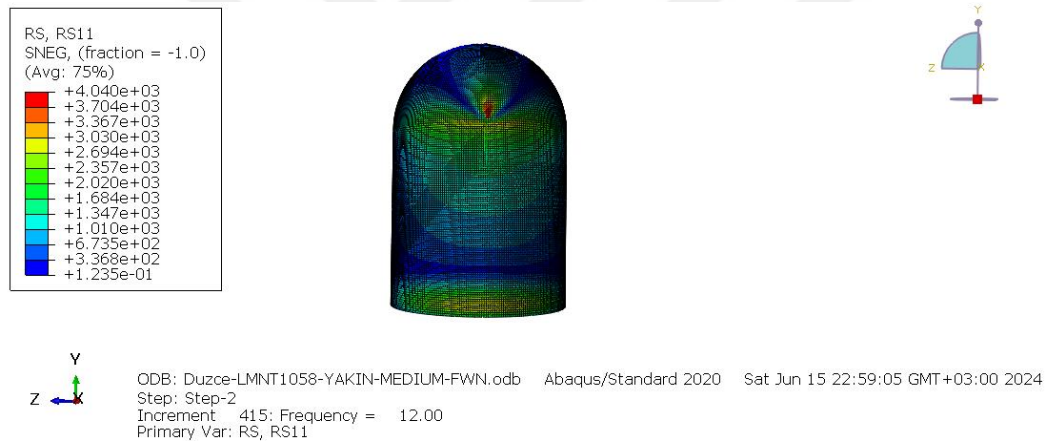


Şekil 4.33. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

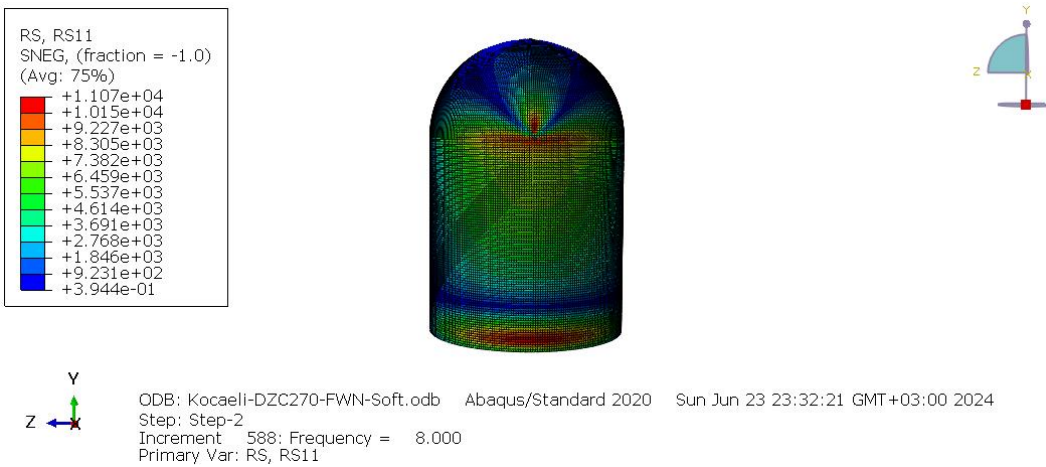
FEBG ve gerçek deprem hareketlerinin kullanıldığı rastgele titreşim analizi ile belirlenen asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



(a)

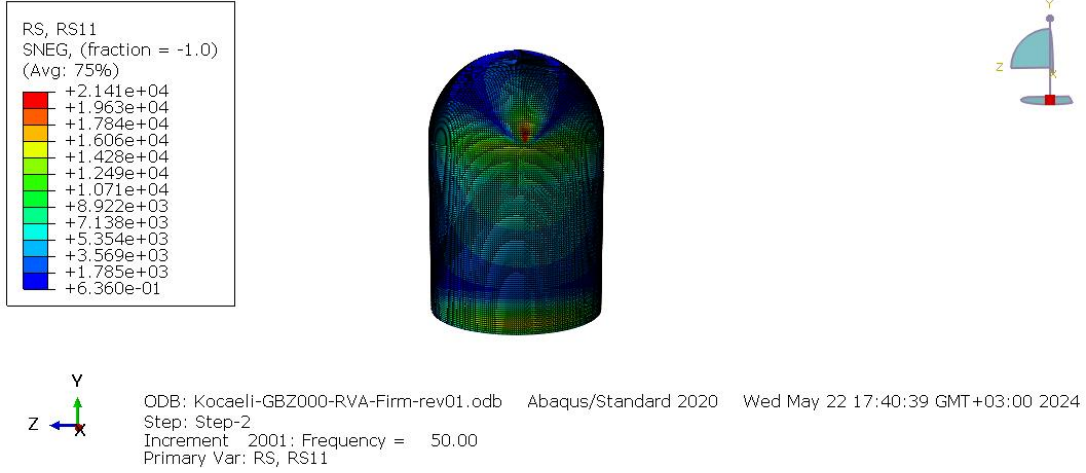


(b)



(c)

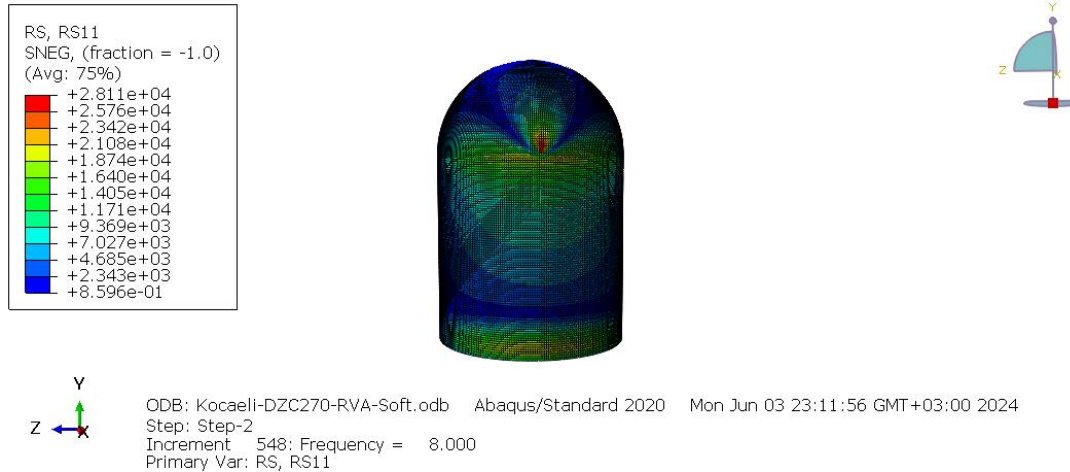
Şekil 4.34. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.35. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

### Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme

Rastgele titreşim analizi sonucunda gerek gerçek yer hareketi gerekse de FEBG modeli için santral binası tepe noktasına ait yer değiştirme ve gerilme bileşenleri için PSD U1, PSD S11 (güç spektral yoğunluk fonksiyonu) ve RMS U1, RMS S11 (karesel ortalamanın karekökü) değerleri frekansa bağlı olarak belirlenmiş ve Şekil 4.31-4.32’de verilmiştir.

Görüleceği üzere dinamik tepkilere ait grafiklerde genel olarak tek bir tepe noktası gözükmemektedir ki bu durumda rezonansa işaret etmektedir. Bunun yanında FEBG modeli için elde edilen GSY ve KOK grafikleri incelenecek olursa sert zemin cinsi için yapı hakim frekansında (4,46 Hz) tek bir tepe noktası gözlenmektedir. Sert zemin cinsinde FEBG modeline ait GSY grafiğine bakılacak olursa, yapı hakim frekansını da içeren frekans bölgesi boyunca GSY grafiği değişim gösterdiğinden, yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde bir tepe noktası ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Orta zemin cinsi için elde edilen GSY grafiği incelenecek olursa en büyük tepe noktası yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde ortaya çıkmakla birlikte, Şekil 4.31’ de görüldüğü gibi orta zemin cinsine ait GSY grafiği 1,4 Hz civarında bir tepe noktası içerdiğinden, yer değiştirme tepkisi için de (PSD U1) bu frekans bölgesinde küçük bir tepe noktası gözükmemektedir. Yumuşak zemin cinsi için elde edilen yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD U1) incelendiğinde ise sert ve orta zemin cinsleri için elde edilen değişimden farklı bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.31’ de de görüleceği üzere yumuşak zemin cinsine ait FEBG modeli GSY grafiğinde 0,9 Hz bölgesinde, dar bir frekans bölgesi boyunca belirgin bir tepe noktası olduğundan, PSD U1 grafiğinde de bu bölgede bir tepe noktası gözlenmektedir. Bunun yanında yine yapı hakim frekans bölgesinde ikinci bir küçük tepe noktası ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla sonuçlar üzerinde, gerek dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin gerekse de yapı sisteminin hakim frekansının etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de görüldüğü gibi gerçek yer hareketi ve FEBG yer hareketi modeli için elde edilen tepki değerleri karşılaştırıldığında, sert zemin cinsi için FEBG modelinin, orta ve yumuşak zemin cinsi için ise gerçek yer hareketi modelinin daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum gerçek ve FEBG modeli için çizilen GSY grafiklerine bakılarak anlaşılabilir (Şekil 4.31). Şekillerden görüleceği üzere santral binası hakim frekansına  $f=4,46\text{Hz}$  karşılık gelen GSY değerleri, sert zeminde FEBG modeli için, orta ve yumuşak zemin durumunda ise gerçek yer hareketi modeli için daha büyüktür. Yapı

hakim frekansı bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir.

#### Zemin cinsine göre değerlendirme

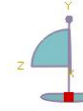
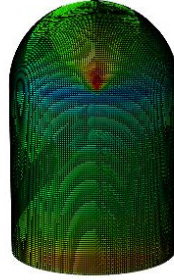
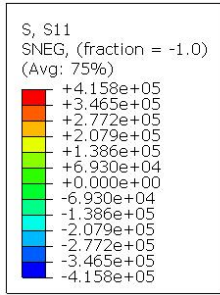
Çizelge 4.31'den görüleceği üzere gerek rastgele titreşim analizinde, gerekse de deterministik dinamik analizde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen tepkiler düzenli bir değişim göstermemektedir.

Deterministik dinamik analizde en büyük yer değiştirme ve gerilmeler yumuşak zemin cinsi için elde edilirken, en küçük tepkiler orta sınıflı zemin cinsi için elde edilmiştir. Aynı değişim, gerçek yer hareketine ait GSY grafiğinin kullanıldığı rastgele titreşim analizinde ortaya çıkmıştır. FEBG modeli kullanılarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analizinde ise maksimum tepkiler sert zemin durumunda ortaya çıkarken, en küçük tepkiler orta sınıflı zemin cinsi için elde edilmiştir (Çizelge 4.4). Bu durum yine yer değiştirme güç spektral yoğunluk fonksiyonuna (PSD U1) bakılarak anlaşılabilir. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de görüleceği üzere santral binası hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük GSY genliğine sahip olan zemin durumları için daha büyük tepkiler elde edilmiştir. Bu durumda zemin cinsinin farklılığından ziyade, yer hareketine ait GSY frekans içeriği ile yapı hakim frekansı arasındaki ilişkinin tepki değerlerinin daha büyük ve daha küçük olmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

### Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme

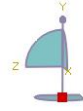
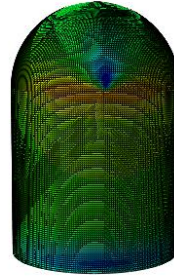
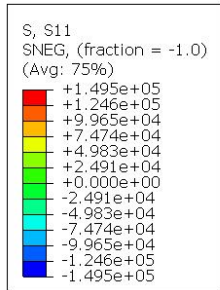
Rastgele titreşim analizleri ve deterministik analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilme sonuçları kıyaslandığında, deterministik analiz sonucunda elde edilen tepkilerin beklenildiği gibi belirgin bir şekilde daha büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.4, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37).

Kocaeli yakın fay deprem kayıtları kullanılarak yapılan, gerçek yer hareketinin dikkate alındığı rastgele titreşim analizi ve deterministik analiz sonuçları kıyaslandığında, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, yumuşak zeminde en büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görülürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme orta sınıflı zeminde gözlenmiştir.



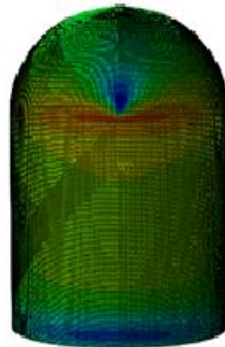
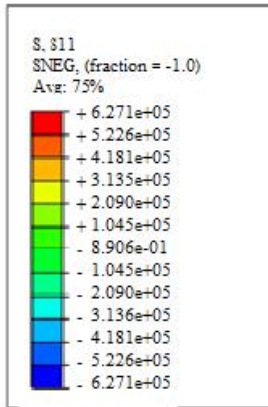
ODB: Kocaeli-GBZ000-Dinamik-Analiz.odb Abaqus/Standard 2020 Wed May 08 18:58:27 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment: 720; Step Time = 7.200  
Primary Var: S, S11

(a)



ODB: Kocaeli-ARE000-Dinamik-Analiz-rev001.odb Abaqus/Standard 2020 Mon Jun 17 12:41:14 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment: 1541; Step Time = 15.41  
Primary Var: S, S11

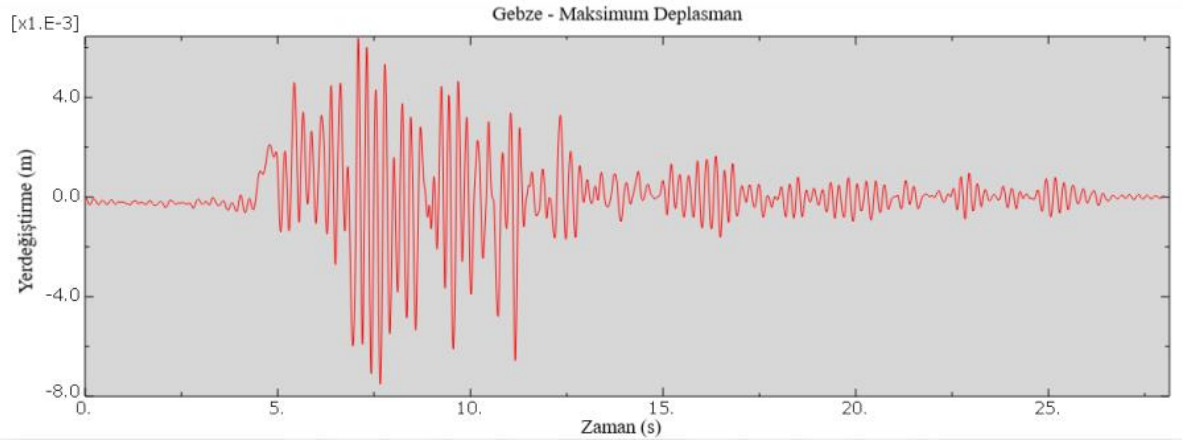
(b)



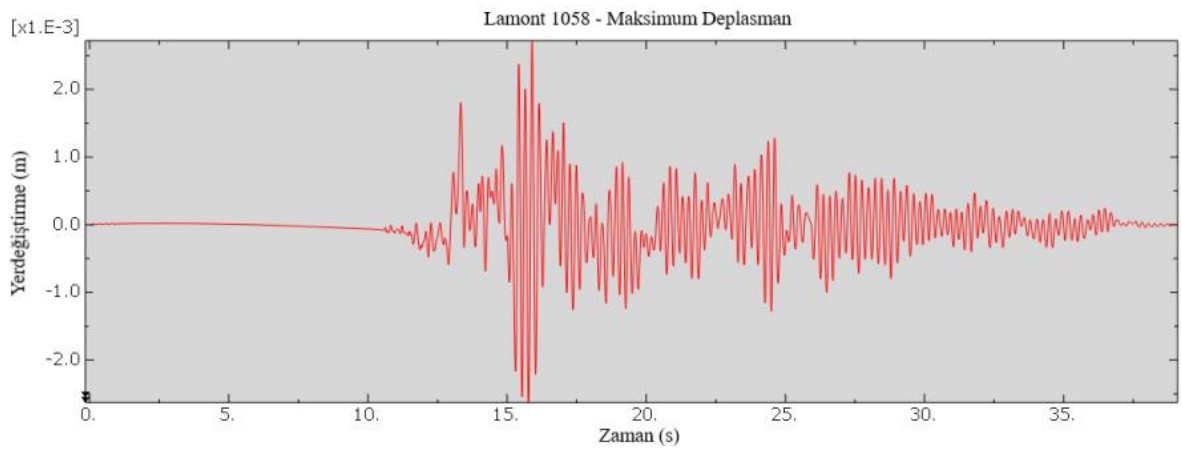
ODB: Duzce-DZC270-Dynamic-Analysis.odb Abaqus/Standard 2020 Mon Feb 18 15:35:27 GMT+03:00 2024  
Step: Step-2, Deprem  
Increment: 818; Step Time = 8.180  
Primary Var: S, S11

(c)

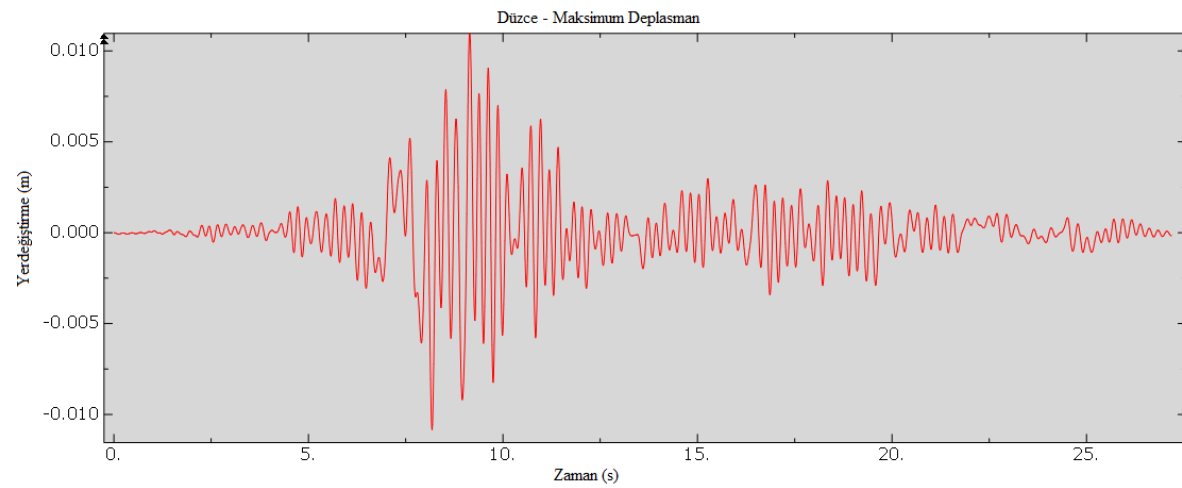
Şekil 4.36. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.37. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri

### 4.3.2. Uzak fay kayıtları

#### Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF)

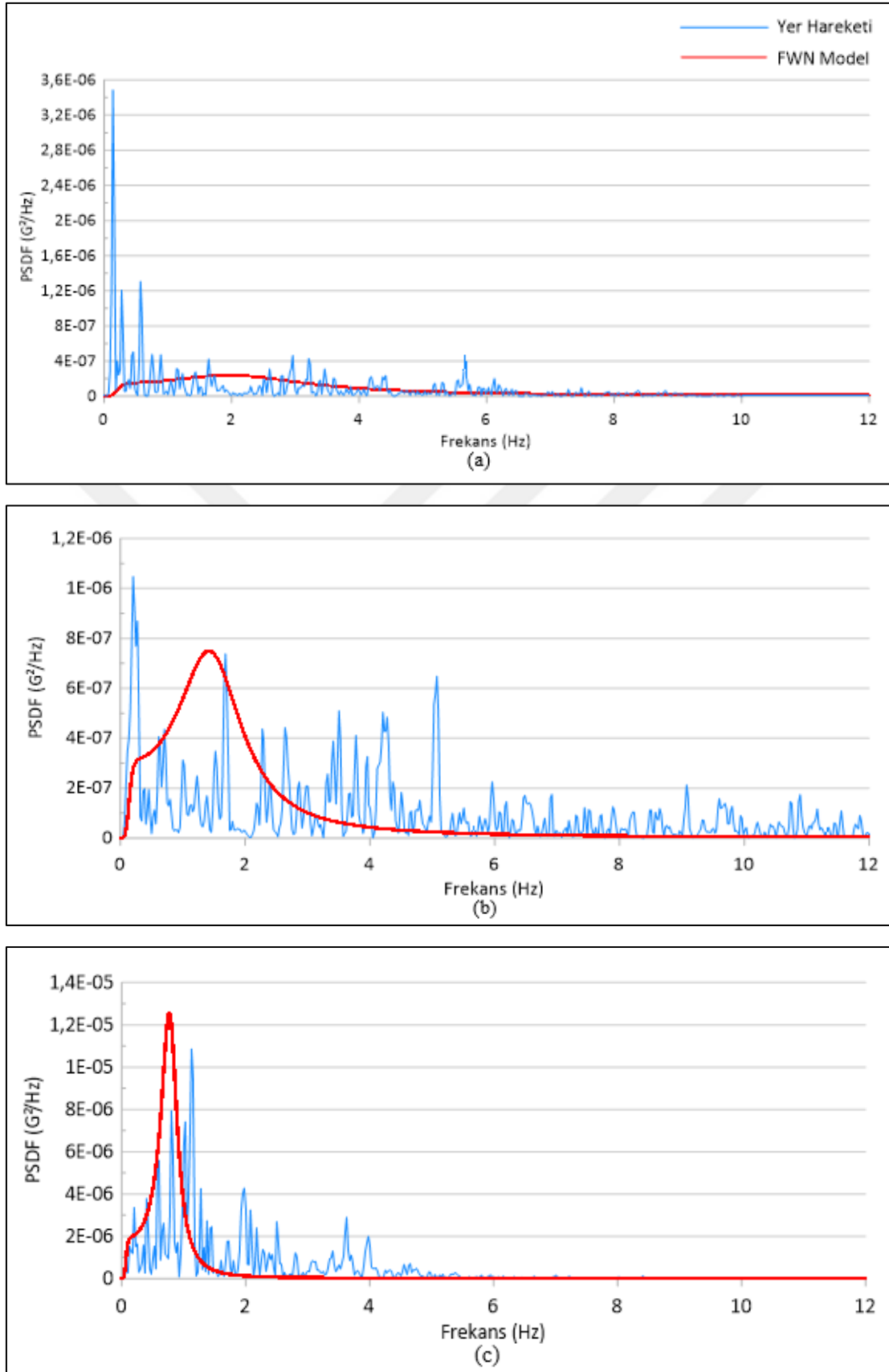
Uzak fay etkisini Kocaeli (1999) depremi için inceleyebilmek amacıyla sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kaydedilen yer ivme hareketlerine karşılık gelen Hava Alanı, Mecidiyeköy ve Lamont 1060 istasyon kayıtları kullanılmıştır. Her bir zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli ve Kocaeli depremi yer hareketi için ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) Şekil 4.38’de gösterilmiştir.

Maksimum yer değiştirme ve gerilmeler rastgele titreşim analizi ve deterministik dinamik analiz ile belirlenmiş ve Çizelge 4.5’ de verilmiştir.

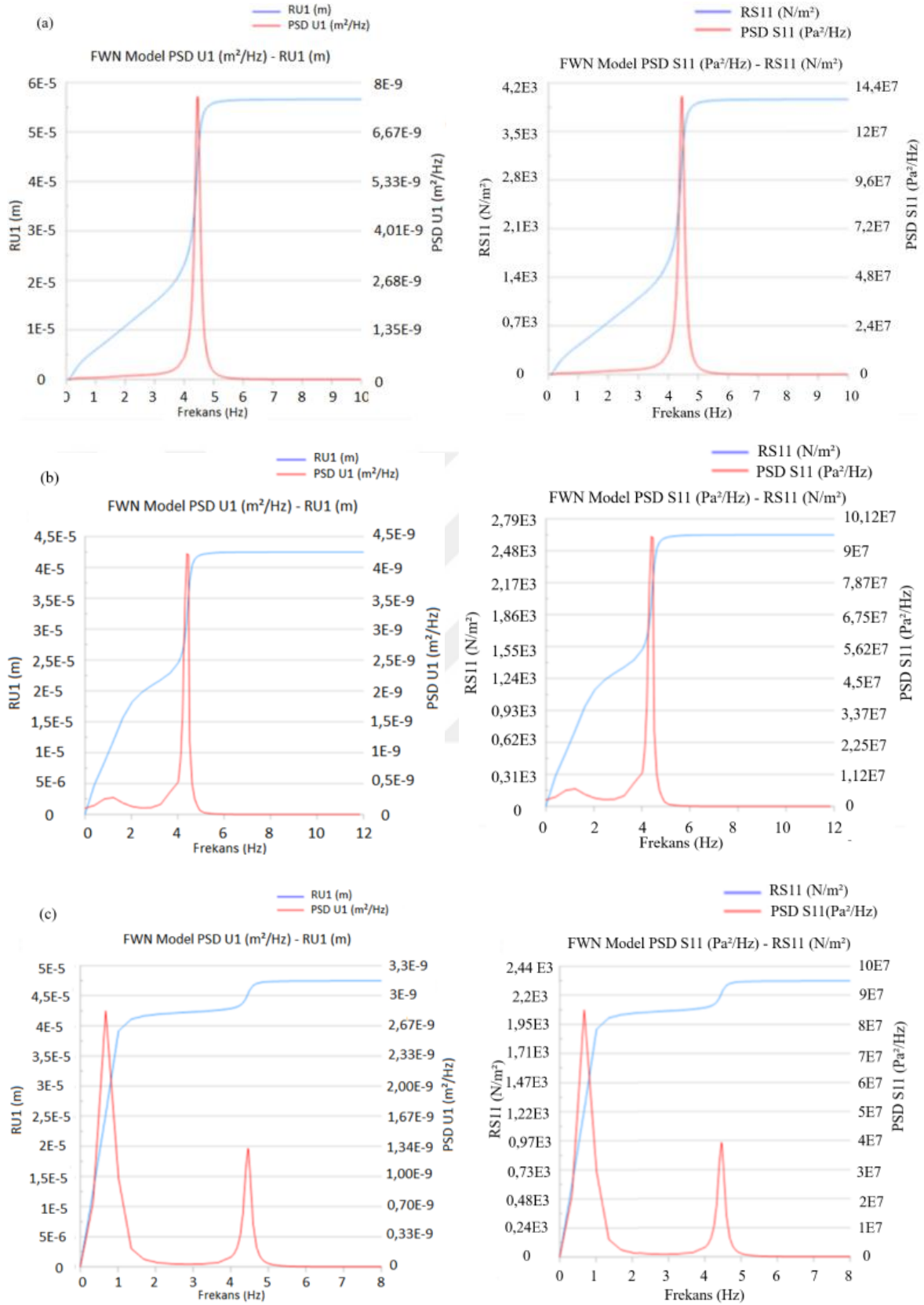
Çizelge 4.5. Analiz sonuçları

Uzak Fay							
Kocaeli		RU1 (m)	RV1 (m/s)	Maksimum			
				Ort. (mm)	U1 (mm)	RS11 (N/m <sup>2</sup> )	S11 (N/m <sup>2</sup> )
Fay Uzaklığı (km)	Gerçek Deprem						
25,88	Sert	5,80E-5	1,55E-3	0,18		3,81E+3	
53,43	Orta	7,50E-5	2,05E-3	0,23		5,01E+3	
60,05	Yumuşak	1,17E-4	3,00E-3	0,36		7,49E+3	
	Filtre Edilmiş Yer Hareketi						
25,88	Sert	5,65E-5	1,50E-3	0,17		3,71E+3	
53,43	Orta	4,25E-5	1,04E-3	0,13		2,65E+3	
60,05	Yumuşak	4,74E-5	6,38E-4	0,13		2,35E+3	
	Deterministik Analiz						
25,88	Sert				1,83		1,29E+5
53,43	Orta				2,41		1,66E+5
60,05	Yumuşak				3,82		2,37E+5

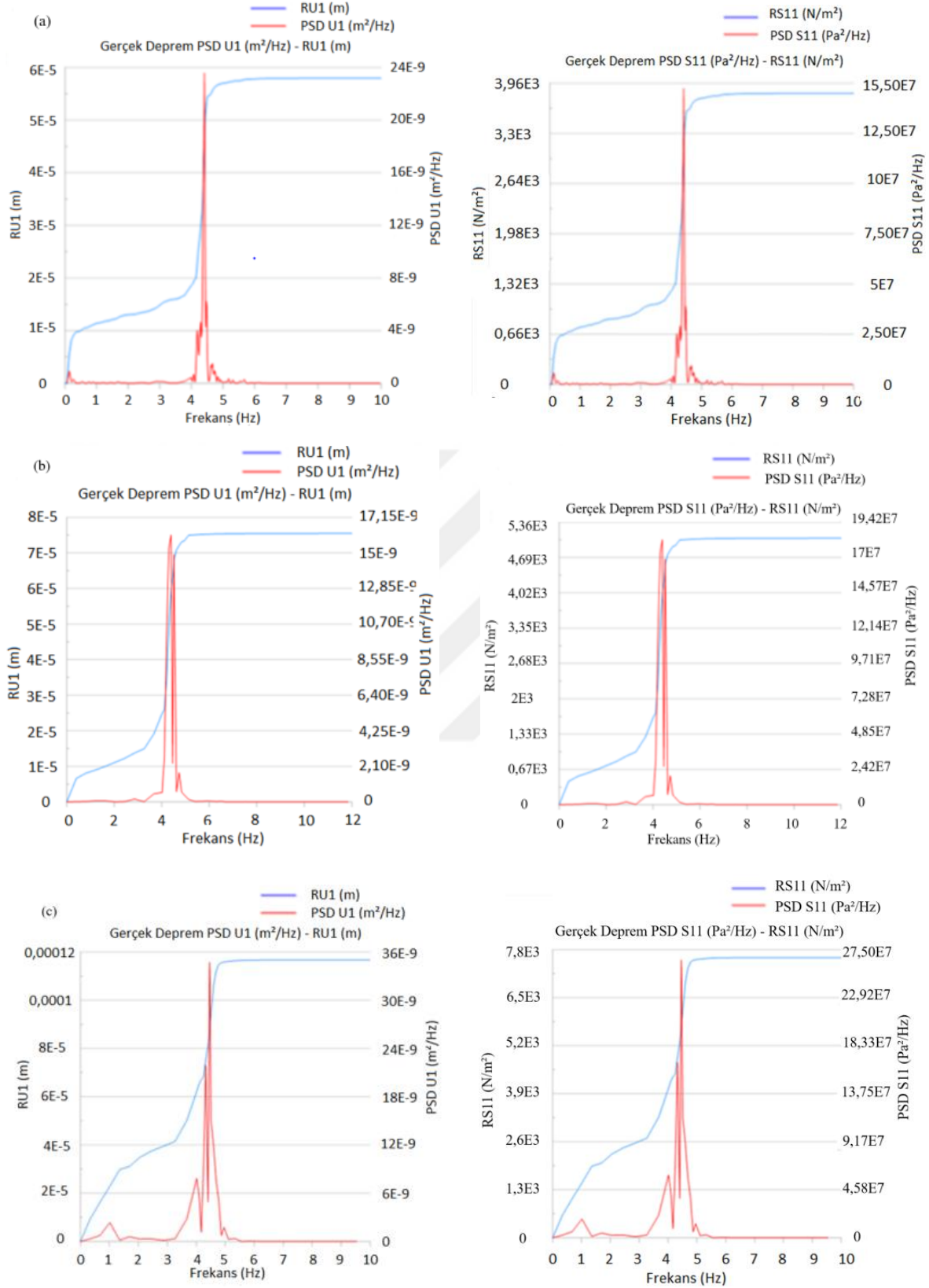
FEBG modeline ve gerçek deprem hareketine ait tepe noktasının PSD U1 (m<sup>2</sup>/Hz), RU1(m), PSD S11(Pa<sup>2</sup>/Hz) ve RS11(N/m<sup>2</sup>) değerleri grafik halinde Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 'da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.38. Güç spektral yoğunluk fonksiyonları (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

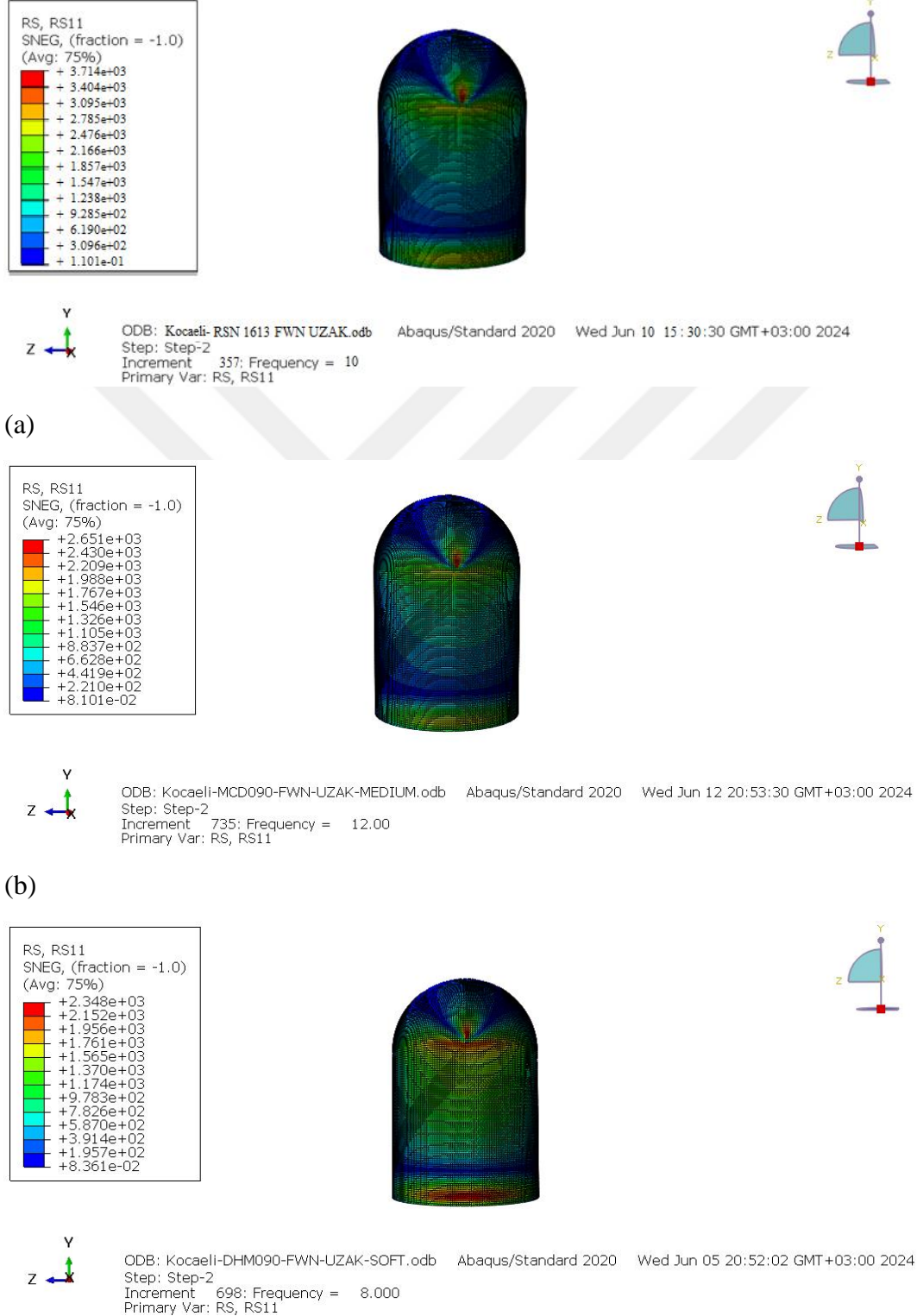


Şekil 4.39. FEBG modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değıştirme ve gerilme değeri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

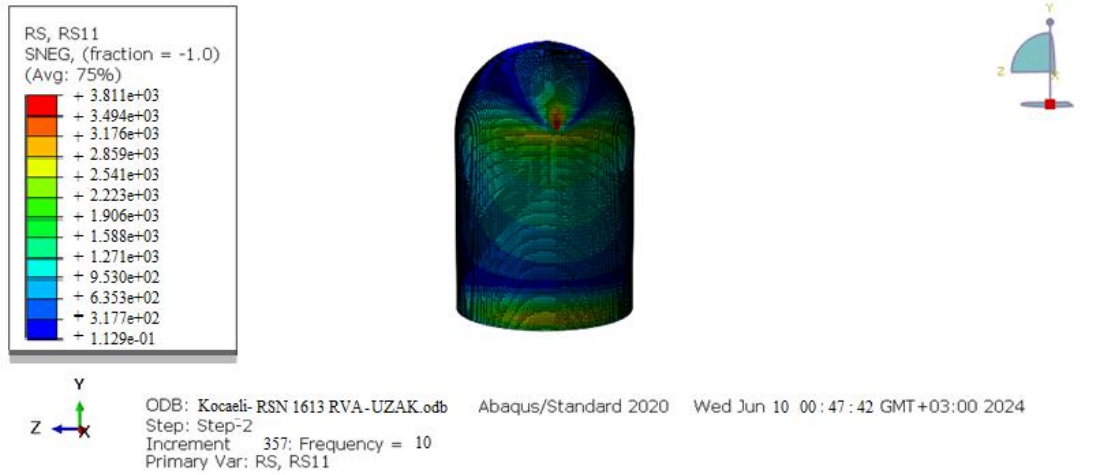


Şekil 4.40. Gerçek deprem modeline ait santral binası tepe noktasının GSY ve KOK cinsinden yer değiştirme ve gerilme değerleri (a) sert zemin, (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

FEBG ve gerçek deprem hareketlerinin kullanıldığı rastgele titreşim analizi ile belirlenen asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



(a) Şekil 4.41. FEBG yer hareketi modeli için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.42. Gerçek deprem hareketi için zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

### Güç spektral yoğunluk fonksiyonuna göre değerlendirme

Rastgele titreşim analizi sonucunda gerek gerçek yer hareketi gerekse de FEBG modeli için santral binası tepe noktasına ait yer değiştirme ve gerilme bileşenleri için PSD U1, PSD S11 (güç spektral yoğunluk fonksiyonu) ve RMS U1, RMS S11 (karesel ortalamanın karekökü) değerleri frekansa bağlı olarak belirlenmiş ve Şekil 4.39-4.40'da verilmiştir.

Görüleceği üzere dinamik tepkilere ait grafiklerde genel olarak tek bir tepe noktası gözükmemektedir ki bu durumda rezonansa işaret etmektedir. Bunun yanında FEBG modeli için elde edilen GSY ve KOK grafikleri incelenecek olursa sert zemin cinsi için yapı hakim frekansında (4,46 Hz) tek bir tepe noktası gözlenmektedir. Sert zemin cinsinde FEBG modeline ait GSY grafiğine bakılacak olursa, yapı hakim frekansını da içeren frekans bölgesi boyunca GSY grafiği değişim gösterdiğinden, yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde bir tepe noktası ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Orta zemin cinsi için elde edilen GSY grafiği incelenecek olursa en büyük tepe noktası yapı hakim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde ortaya çıkmakla birlikte, Şekil 4.38' de görüldüğü gibi orta zemin cinsine ait GSY grafiği 1,2 Hz civarında bir tepe noktası içerdiğinden, yer değiştirme tepkisi için de (PSD U1) bu frekans bölgesinde küçük bir tepe noktası gözlenmektedir. Yumuşak zemin cinsi için elde edilen yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD U1) incelendiğinde ise sert ve orta zemin cinsleri için elde edilen değişimden farklı bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.38' de de görüleceği üzere yumuşak zemin cinsine ait FEBG modeli GSY grafiğinde 0,9 Hz bölgesinde, dar bir frekans bölgesi boyunca belirgin bir tepe noktası olduğundan, PSD U1 grafiğinde de bu bölgede bir tepe noktası gözlenmektedir. Bunun yanında yine yapı hakim frekans bölgesinde ikinci bir küçük tepe noktası ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.5, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da görüldüğü gibi gerçek yer hareketi ve FEBG yer hareketi modeli için elde edilen tepki değerleri karşılaştırıldığında, sert, orta ve yumuşak zemin cinsi için gerçek yer hareketi modelinin FEBG modelinden daha büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum gerçek ve FEBG modeli için çizilen GSY grafiklerine bakılarak anlaşılabilir (Şekil 4.38). Şekillerden görüleceği üzere santral binası hakim frekansına  $f=4,46\text{Hz}$  karşılık gelen GSY değerleri, sert, orta ve yumuşak zemin durumunda gerçek yer hareketi modelinde FEBG modelinden daha büyüktür. Yapı hakim frekans bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık

yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir.

#### Zemin cinsine göre değerlendirme

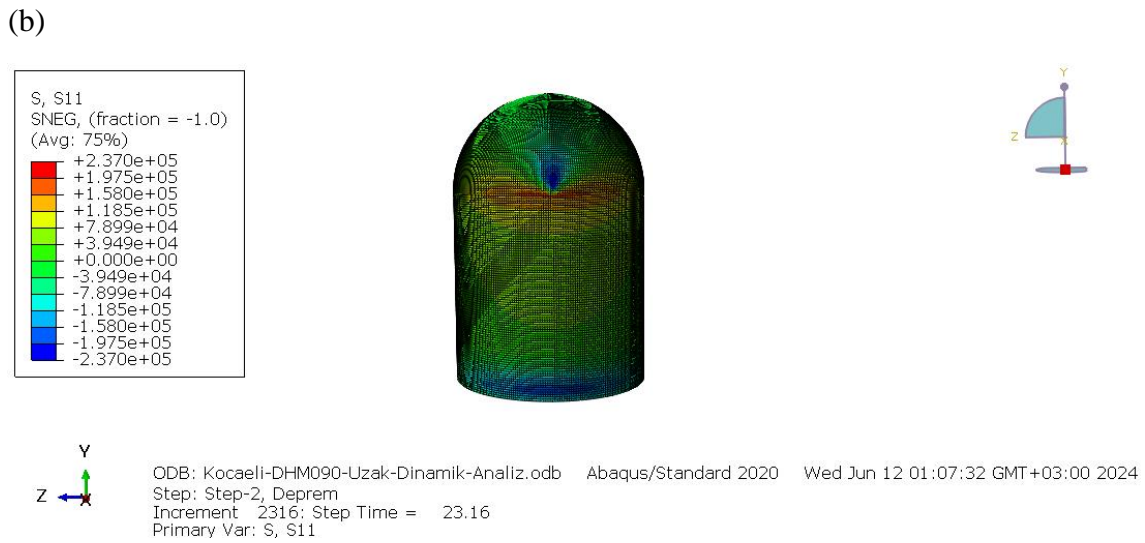
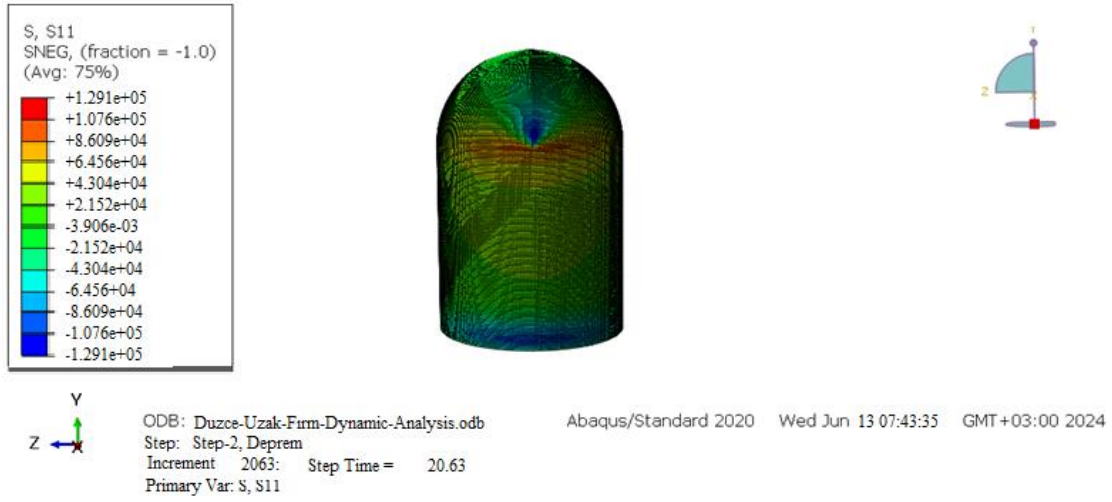
Çizelge 4.38'den görüleceği üzere gerek rastgele titreşim analizinde, gerekse de deterministik dinamik analizde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen tepkiler düzenli bir değişim göstermemektedir.

Deterministik dinamik analizde en büyük yer değiştirme ve gerilmeler yumuşak zemin cinsi için elde edilirken, en küçük tepkiler sert zemin cinsi için elde edilmiştir. Aynı değişim, gerçek yer hareketine ait GSY grafiğinin kullanıldığı rastgele titreşim analizinde ortaya çıkmıştır. FEBG modeli kullanılarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analizinde ise maksimum tepkiler sert zemin durumunda ortaya çıkarken, en küçük tepkiler orta sınıflı zemin cinsi için elde edilmiştir (Çizelge 4.5). Bu durum yine yer değiştirme güç spektral yoğunluk fonksiyonuna (PSD U1) bakılarak anlaşılabilir. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da görüleceği üzere santral binası hâkim frekansına karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük GSY genliğine sahip olan zemin durumları için daha büyük tepkiler elde edilmiştir. Bu durumda zemin cinsinin farklılığından ziyade, yer hareketine ait GSY frekans içeriği ile yapı hâkim frekansı arasındaki ilişkinin tepki değerlerinin daha büyük ve daha küçük olmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

### Deterministik analiz ve rastgele titreşim analizine göre değerlendirme

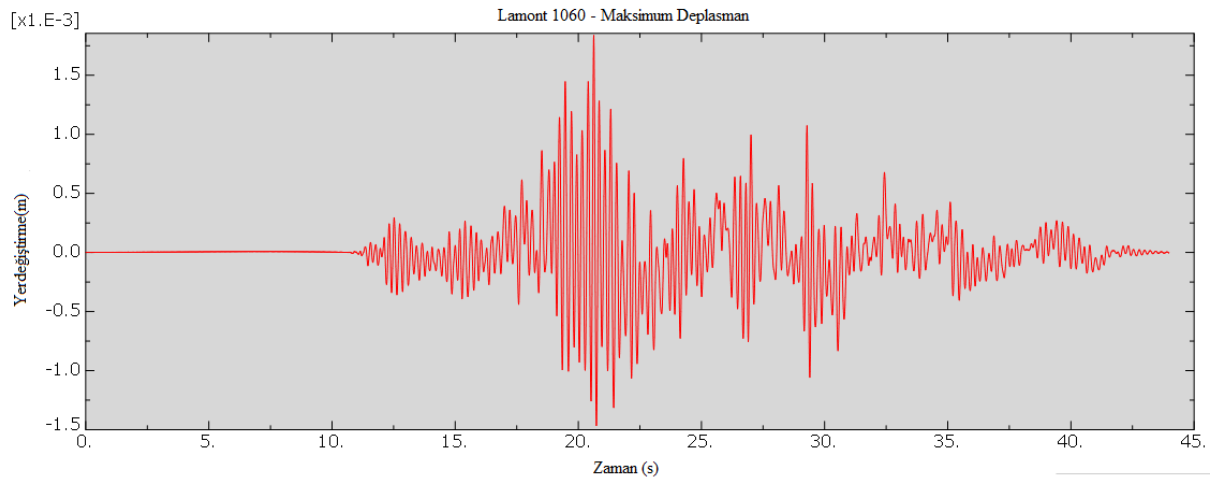
Rastgele titreşim analizleri ve deterministik analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilme sonuçları kıyaslandığında, deterministik analiz sonucunda elde edilen tepkilerin beklenildiği gibi belirgin bir şekilde daha büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.5, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44).

Kocaeli uzak fay deprem kayıtları kullanılarak yapılan, gerçek yer hareketinin dikkate alındığı rastgele titreşim analizi ve deterministik analiz sonuçları kıyaslandığında, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, yumuşak zeminde en büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görülürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme sert zeminde gözlenmiştir.

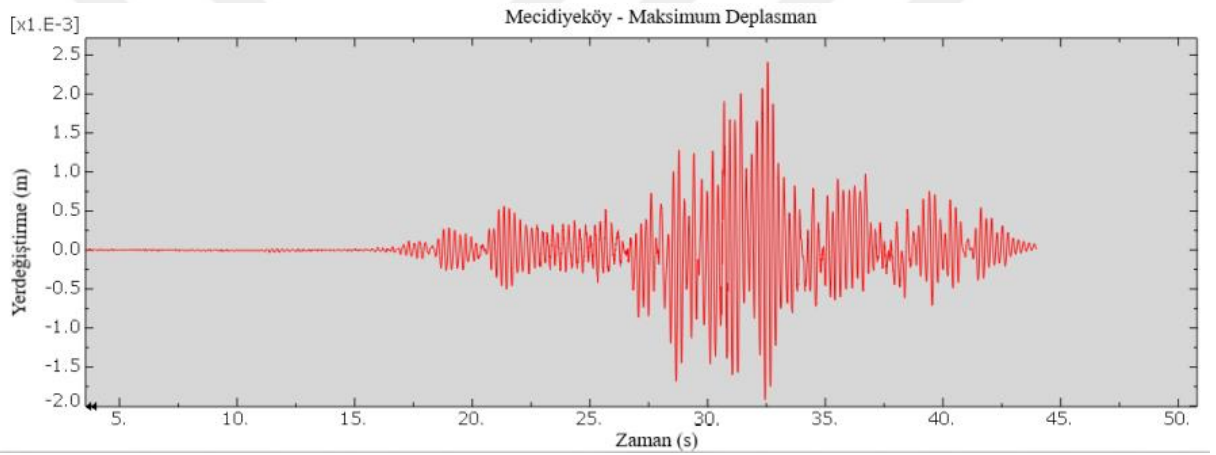


(c)

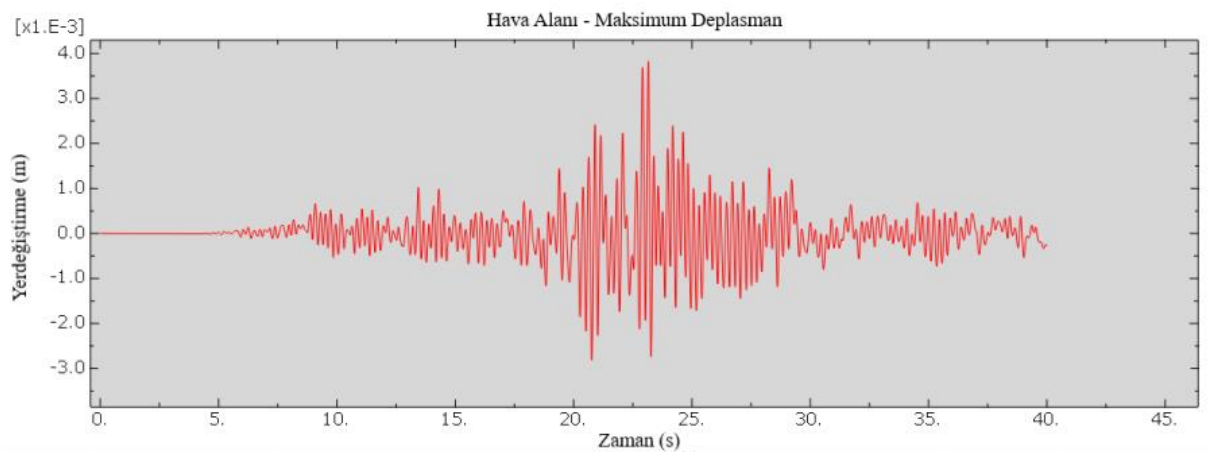
Şekil 4.43. Deterministik analiz sonucu zemin tiplerine göre yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin



(a)



(b)



(c)

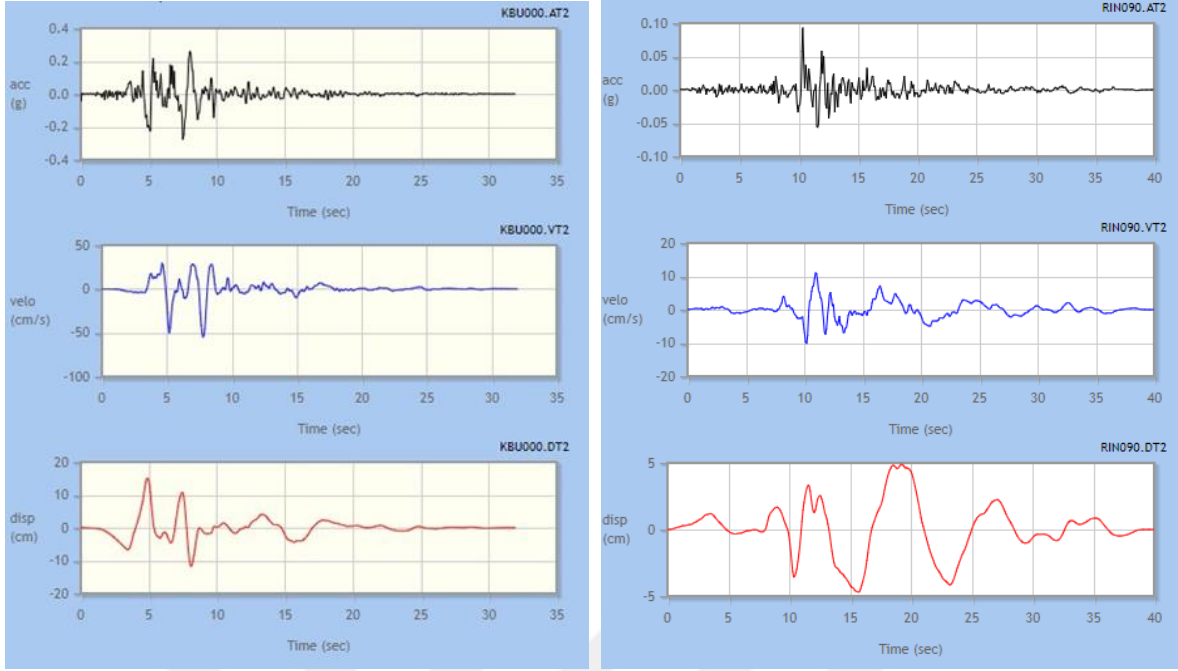
Şekil 4.44. Deterministik dinamik analiz ile bulunan tepe noktası yer değiştirme-zaman grafikleri (a) sert zemin , (b) orta zemin, (c) yumuşak zemin

#### 4.4. Fay Uzaklığına Göre Değerlendirme

Tezin bu bölümünde, uzak ve yakın fay durumunun analiz sonuçlarına etkisi yorumlanmıştır.

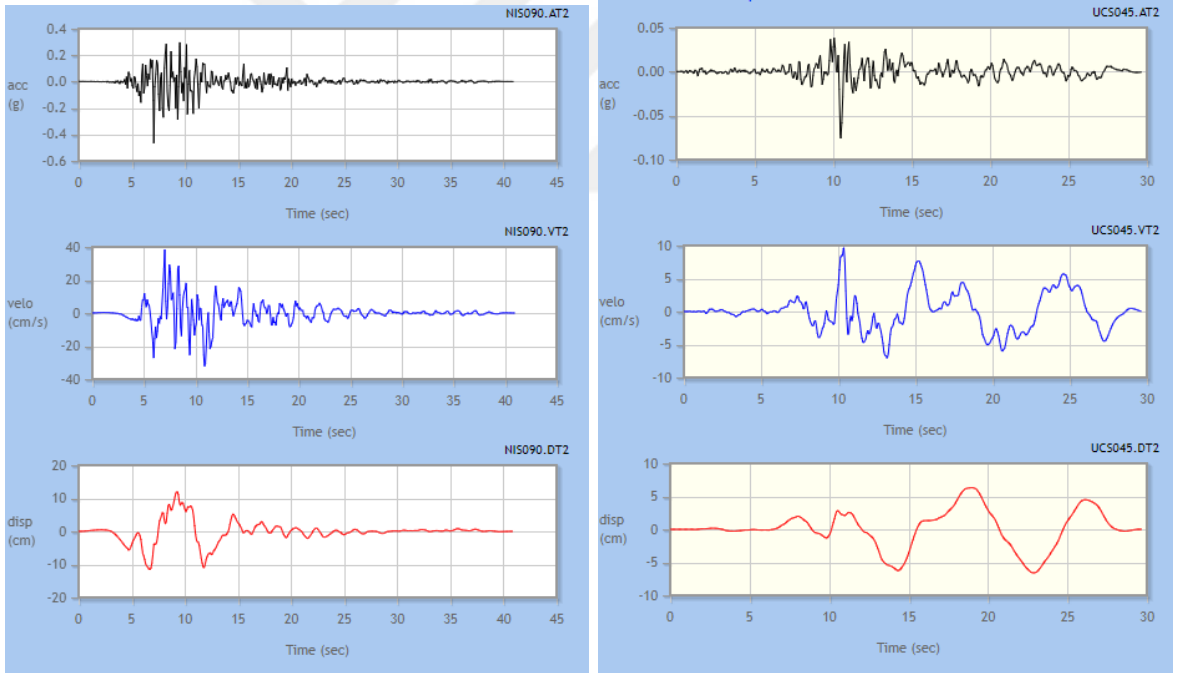
Uzak fay durumundaki deprem kayıtları analiz edildiğinde, yakın fay durumundaki deprem kayıtlarının analiz sonuçlarına göre yapıda hem yer değiştirme hem de gerilme olarak daha az değerler verdiği açıkça görülmektedir. Her bir deprem kaydının ivme-zaman, yer değiştirme-zaman ve hız-zaman kayıtları incelendiğinde yakın fay deprem yer hareketi durumunda, uzak fay etkisindeki deprem hareketlerine göre özellikle hız değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir (Şekil 4.45 ve Şekil 4.46). Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da her bir deprem kaydı için sırasıyla ivme, hız ve yer değiştirme-zaman grafiklerine yer verilmiştir. Uzak ve yakın fay durumunda, her bir deprem kaydına ayrı ayrı bakıldığında, yer değiştirme ve gerilme değerlerinin birbirleriyle orantılı değerler verdiği de anlaşılmaktadır. Örneğin, Kobe depreminde uzak ve yakın fay deprem hareketleri için elde edilen yer değiştirmelerin ve gerilmelerin benzer bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır (Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3). Aynı durum Kocaeli deprem kayıtlarında da mevcuttur (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5).

Bunun yanında yakın fay ve uzak fay yer hareketleri ile gerek gerçek yer hareketi, gerekse de FEBG modeli için elde edilen tepkiler sistematik bir değişim göstermemektedir. Sonuçlar üzerinde daha çok yer hareketi frekans içeriği ile yapı sisteminin hâkim frekansı arasındaki ilişkinin etkili olduğu anlaşılmaktadır.



(a)

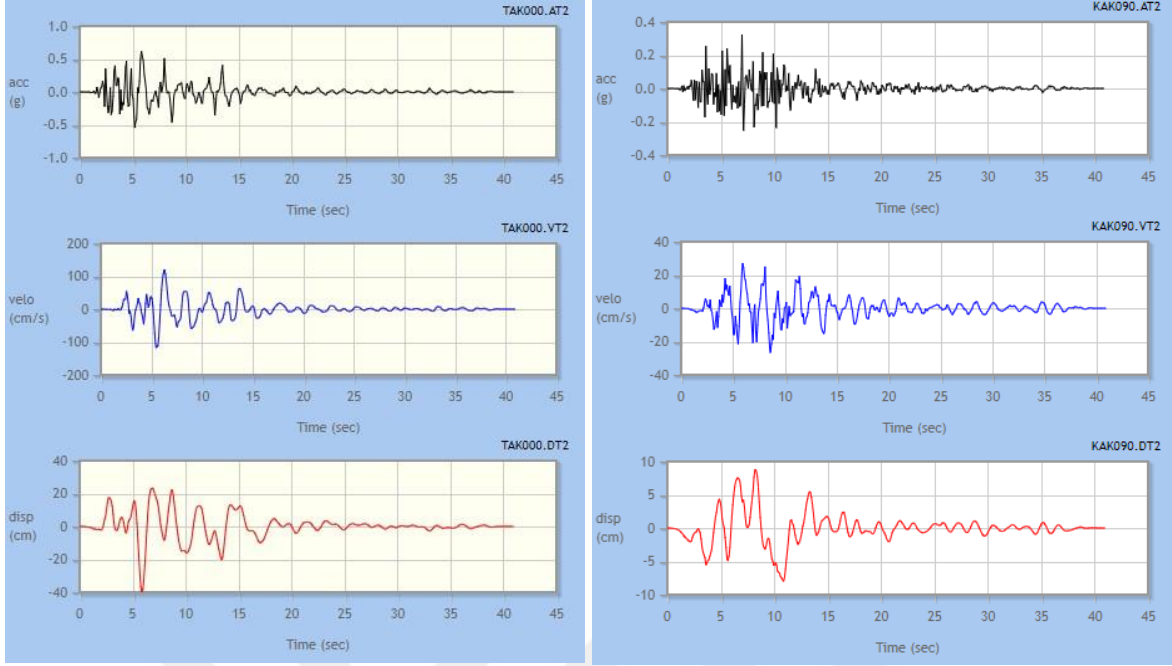
(b)



(c)

(d)

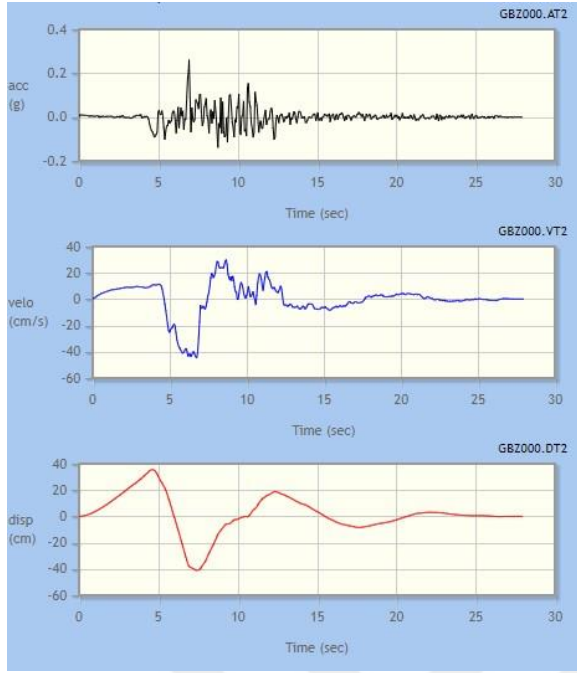
Şekil 4.45. Kobe depremine ait ivme, hız ve yer değıştirme-zaman kayıtları (a) Yakın fay (Kobe Üniversitesi), (b) Uzak fay (SF-Rincon Hill), (c) Yakın fay (Nishi-Akashi), (d) Uzak fay (Berkeley Strawberry Canyon), (e) Yakın fay (Takatori), (f) Uzak fay (Kakogawa)



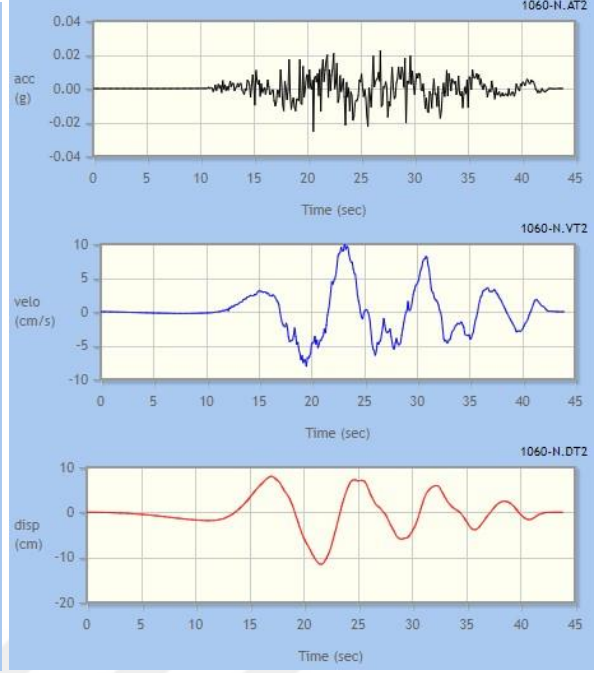
(e)

(f)

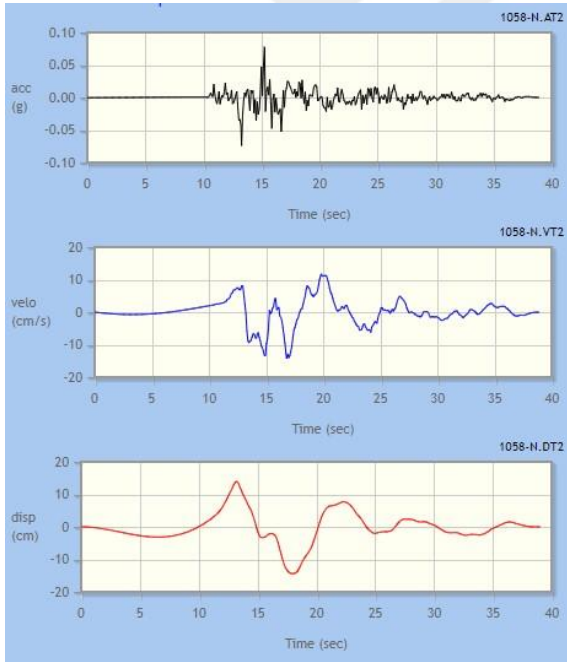
Şekil 4.45. (Devamı) Kobe depremine ait ivme, hız ve yer değıştirme-zaman kayıtları (a) Yakın fay (Kobe Üniversitesi), (b) Uzak fay (SF-Rincon Hill), (c) Yakın fay (Nishi-Akashi), (d) Uzak fay (Berkeley Strawberry Canyon), (e) Yakın fay (Takatori), (f) Uzak fay (Kakogawa)



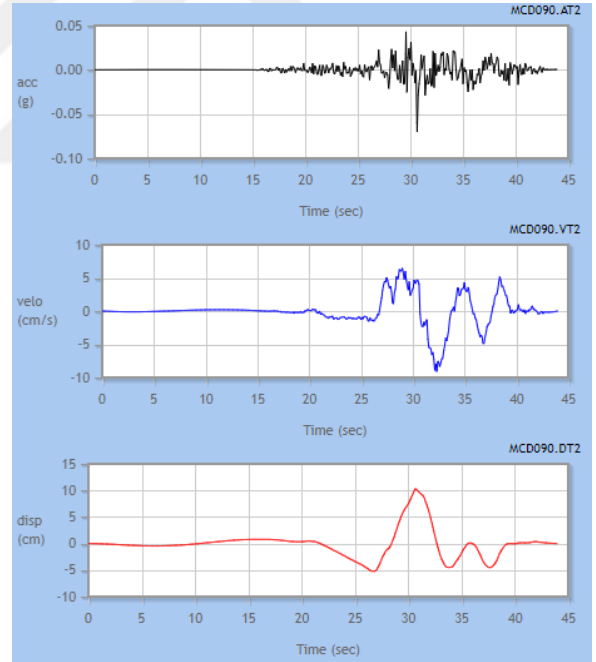
(a)



(b)

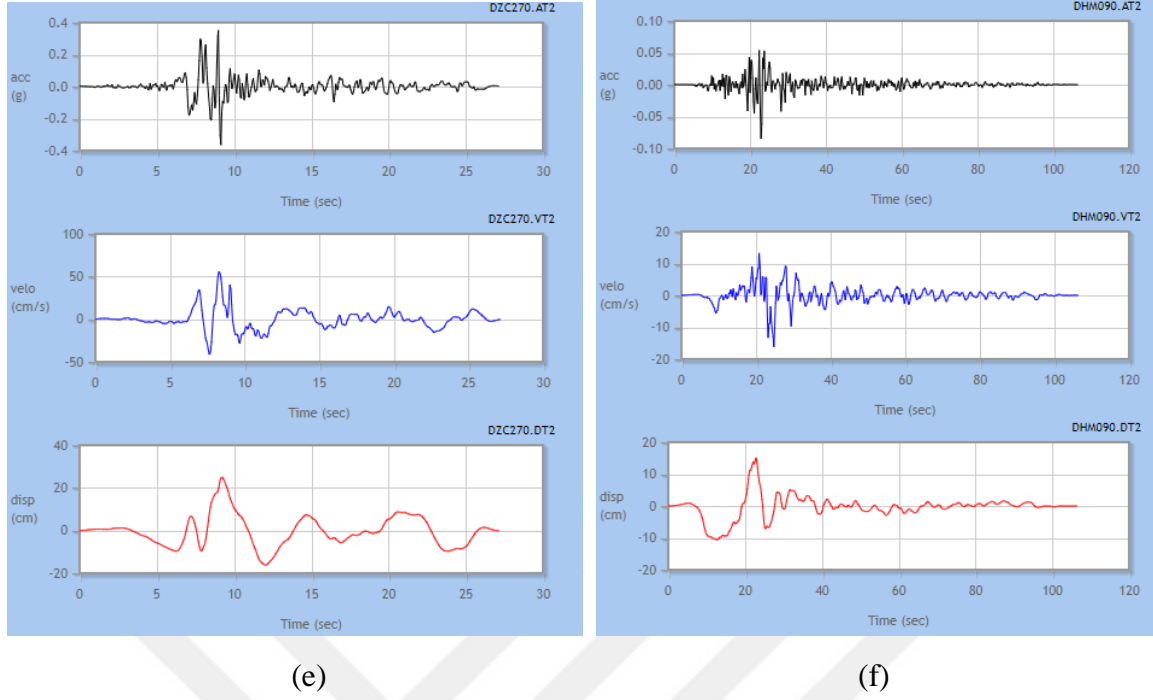


(c)



(d)

Şekil 4.46. Kocaeli depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman kayıtları (a) Yakın fay (Gebze), (b) Uzak fay (Lamont 1060), (c) Yakın fay (Lamont 1058), (d) Uzak fay (Mecidiyeköy), (e) Yakın fay (Düzce), (f) Uzak fay (Hava Alanı)



Şekil 4.46. (Devamı) Kocaeli depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman kayıtları  
 (a) Yakın fay(Gebze), (b) Uzak fay (Lamont 1060), (c) Yakın fay (Lamont 1058),  
 (d) Uzak fay (Mecidiyeköy), (e) Yakın fay (Düzce), (f) Uzak fay (Hava Alanı)

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir nükleer santral yapısının deprem yükü altındaki dinamik davranışını rastgele titreşim ve deterministik yöntemlerle incelemek, deprem etkilerini detaylı bir şekilde araştırmak amacıyla, FEBG yer hareketi modeli ve gerçek deprem yer hareketini dikkate alan rastgele titreşim teorisi ile yer hareketinin zamana bağlı değişimini dikkate alan deterministik analiz yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Uygulama amacıyla tipik bir nükleer santral yapısı seçilmiştir. Söz konusu yapının yatay doğrultuda uygulanan deprem hareketi etkisindeki rastgele titreşim analizi ve deterministik analizi için sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Santral binasının analizi yapılırken zemin tipi farklılıkları, fay uzaklığı, dikkate alınan analiz yöntemi gibi farklı parametreler ele alınmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

Çalışmada öncelikle, filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeli için elde edilen sonuçlar, gerçek deprem hareketi için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek deprem hareketini ne ölçüde yansıttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için farklı deprem hareketlerine ait gerçek ve filtre edilmiş ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları oluşturulmuştur. FEBG modeli ve gerçek deprem ile oluşturulmuş güç spektral yoğunluk fonksiyonlarının altında kalan alanların birbirine eşitlenerek FEBG modeli için  $S_0$  değeri her bir zemin cinsi için belirlenmiştir. Çalışmada dikkate alınan ChiChi, Kocaeli ve Kobe depremleri için bazen FEBG yer hareketi modeli için bazen de gerçek yer hareketi için elde edilen yapısal tepkilerin daha büyük olduğu gözlenmiştir. Yapı hakim frekansı bölgesine karşılık gelen frekans bölgesinde daha büyük genliğe sahip olan rastgele yüklerin, dinamik tepkiler üzerinde genelde daha etkili olacağı öngörüldüğünden, yapısal tepkilerde ortaya çıkan bu farklılık yapı hakim frekansına karşılık gelen GSY genlik değerlerinin daha büyük veya daha küçük olması ile açıklanabilmektedir. Dolayısıyla sonuçlar üzerinde, gerek dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin gerekse de yapı sisteminin hakim frekansının etkili olacağı anlaşılmaktadır.

Yer değiştirme, hız ve gerilme için elde edilen dinamik tepkiler incelendiğinde, gerçek yer hareketine ait ve FEBG modeline ait GSY kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. FEBG modeli için sert, orta ve yumuşak zemin cinsi için  $S_0$  değerleri, gerçek yer hareketinin varyansı, FEBG modelinin varyansına eşitlenmek

suretiyle bulunmasına rağmen sonuçlar arasındaki farklılık dikkat çekicidir. Her iki yer hareketi modeli için GSY grafikleri altındaki alanlar her bir zemin cinsi için birbirine eşit olmakla birlikte, gerçek deprem hareketine ait GSY grafikleri seçilen deprem hareketine bağlı olarak farklı iniş çıkışlar göstermektedir. Bu da dinamik tepkiler üzerinde etkili olmaktadır. Farklı bir deprem hareketinin seçilmesi durumunda yine GSY grafiğinde farklı iniş-çıkışlar olacağından, dinamik tepkiler yine değişkenlik gösterecektir. Bu nedenle seçilecek tek bir deprem hareketine bağlı olmayan FEBG modelinin kullanılması, tepkilerin seçilecek deprem hareketine bağlı kalmasını oldukça sınırlayacaktır.

Gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonunun kullanılması durumunda hesapların güçleşeceği düşünülürse, FEBG modelinin bir yaklaşım olarak kullanılmasının kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada ayrıca deterministik ve rastgele titreşim teorisi ( FEBG ve gerçek yer hareketi modeli) dikkate alınarak elde edilen dinamik analiz sonuçları karşılaştırılarak, rastgele titreşim analizi ile bulunan yapısal tepkilerin deterministik analiz sonuçları ile ne ölçüde uyumlu olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ortalama maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama maksimum yer değiştirme, bir yapının rastgele titreşim analizi sırasında yapının en büyük yer değiştirme değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Bu tanıma göre, ortalama maksimum değer, maksimum yer değiştirmeden daha küçük olması doğaldır. Rastgele titreşim analizleri sonucunda elde edilen ortalama maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerlerinin deterministik analiz sonucu elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilmelerden beklenildiği gibi belirgin bir şekilde daha küçük çıktığı gözlenmiştir.

Ayrıca, gerçek yer hareketi dikkate alınarak gerçekleştirilen rastgele titreşim analiz sonuçları ile deterministik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, farklı zemin tiplerinde maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerinin sıralama olarak benzer değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, ChiChi depreminde her iki analizde de orta sınıflı zeminde en büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri görülürken, her iki analizde de en küçük gerilme ve yer değiştirme değerleri sert zeminde gözlenmiştir. Bu durumun, Kobe ve Kocaeli depremleri için de geçerli olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler dikkate alındığında, rastgele titreşim analizinin deterministik analiz ile uyumlu değişen sonuçlar verdiği görülmektedir.

Analiz sonuçlarına bakıldığında, deterministik analizin rastgele titreşim analizine göre daha kritik sonuçlar verdiği görülmektedir. Nükleer santral tasarımlarında, deterministik analizin hesaplama kolaylığı, hızlı ve genellikle yeterli sonuçlar sağlayabildiği, rastgele titreşim analizinin ise teorik olarak daha detaylı ve gerçekçi sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Bu nedenle, nükleer santral yapı tasarımlarında teorik olarak daha detaylı analiz durumlarında deprem hareketi gibi dinamik etkilerin de rastgele olması nedeniyle deterministik analizin yanında rastgele etkilerin dikkate alındığı rastgele titreşim analizinin de yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın son bölümünde, yakın fay ve uzak fay yer hareketi etkisindeki nükleer santral binasının dinamik analizi yapılarak elde edilen yapısal tepkiler karşılaştırılmıştır. Uzak fay deprem kayıtları için analiz yapıldığında, yakın fay deprem kayıtları için elde edilen analiz sonuçlarına göre yapıda hem yer değiştirme hem de gerilme olarak daha küçük değerlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Deprem dalgaları merkez üst noktasından uzaklaştıkça enerji kaybedeceğinden ve yayılarak dağılacığından uzak fay yer hareketi durumunda yapıda oluşan gerilme ve deplasman değerlerinin genellikle daha küçük çıkması beklenmektedir. Yakın fay yer hareketi etkisi için nükleer santral yapısında elde edilen yapısal tepkilerin, uzak fay etkisine göre daha fazla çıkmasının sebebi ivme, hız ve yer değiştirme – zaman grafikleri incelenerek de açıklanabilir. Yakın fay etkisindeki deprem kayıtları için özellikle hız-zaman değerleri, uzak fay yer hareketine göre belirgin bir şekilde daha büyüktür.

Bunun yanında yakın fay ve uzak fay yer hareketleri ile gerek gerçek yer hareketi, gerekse de FEBG modeli için elde edilen tepkiler sistematik bir değişim göstermemektedir. Sonuçlar üzerinde daha çok yer hareketi frekans içeriği ile yapı sisteminin hâkim frekansı arasındaki ilişkinin etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, zemin tipi, fay uzaklığı ve analiz yöntemleri gibi parametrelerin nükleer santral yapısının dinamik tepkileri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Deprem hareketi gibi diğer dinamik etkilerin (rüzgar yükü, insan hareketleri vb.) rastgele olması beklendiğinden, analizlerde bu belirsizliği dikkate alacak bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Deterministik analiz yönteminin bu konuda yetersiz kalması ve bundan dolayı, deterministik analiz yönteminin yanında nükleer santral yapılarının rastgele titreşim teorisi ile de incelenmesi, deterministik analiz kadar rastgele titreşim analizinin de yapı sistemlerinin daha gerçekçi

modellenebilmesi açısından önem arz ettiği, bu nedenle de bundan sonraki çalışmalarda bu konuların daha da detaylı bir şekilde araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

Sonuçları maddeler halinde kısaca özetlemek gerekirse,

- Zemin tipi, fay uzaklığı ve analiz yöntemleri gibi parametrelerin nükleer santral yapısının dinamik tepkileri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
- FEBG modeli için elde edilen sonuçlar, gerçek deprem hareketi için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış, sonuçlar üzerinde dikkate alınan yer hareketinin frekans içeriğinin ve yapı sisteminin hakim frekansının etkili olduğu görülmüştür.
- Gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonunun kullanılması durumunda hesapların güçleşeceği ve FEBG modelinin bir yaklaşım olarak kullanılmasının kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.
- Rastgele titreşim analizi ile bulunan yapısal tepkilerin deterministik analiz sonuçları ile ne ölçüde uyumlu olduğu belirlenmeye çalışılmış ve rastgele titreşim analizinin deterministik analiz ile uyumlu değişen sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Nükleer santral tasarımlarında, deterministik analizin hesaplama kolaylığı sağladığı, hızlı ve genellikle güvenilir sonuçlar ürettiği, rastgele titreşim analizinin ise teorik olarak daha detaylı ve gerçekçi sonuçlar verdiği düşünülmektedir.
- Yakın fay yer hareketi etkisi için nükleer santral yapısında elde edilen yapısal tepkiler, uzak fay etkisine oranla daha büyük çıkmıştır. Yakın fay kayıtlarına ait hız-zaman değerlerinin daha büyük olması ve hız-zaman grafiklerinde gözlemlenen darbe etkisi bu sonuca neden olmuştur.
- Yakın fay ve uzak fay yer hareketleri ile gerek gerçek yer hareketi, gerekse de FEBG modeli için elde edilen tepkilerin sistematik bir değişim göstermediği, sonuçlar üzerinde daha çok yer hareketi frekans içeriği ile yapı sisteminin hâkim frekansı arasındaki ilişkinin etkili olduğu görülmüştür.
- Deterministik analiz kadar rastgele titreşim analizinin de yapılmasının yapı sistemlerinin daha gerçekçi modellenebilmesi açısından önem arz ettiği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının devamı olarak nükleer santral yapılarının gerek sismik taban izolatör kullanılarak gerekse de yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak rastgele titreşim analizlerinin yapılması, nükleer santral yapılarının daha güvenli bir şekilde tasarımının yapılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yapı-zemin etkileşimi yapının zeminle etkileşimini ve bu etkileşimin yapının performansına nasıl etki ettiğini ifade etmektedir. Yapıların zemin üzerindeki davranışını ve zeminin yapıya aktardığı kuvvetleri anlamak için önemlidir. Rastgele titreşim analizi ile nükleer santral yapısının zeminle etkileşimi daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilir. Zemin koşullarının ve deprem hareketinin rastgele değişkenlikleri göz önünde bulundurularak, yapısal tepkiler daha doğru bir şekilde değerlendirilebilir.

Yapı-zemin etkileşimi yanında, rastgele titreşim analizi sismik taban izolatörlü nükleer santral yapılarının performansını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmede kullanılabilir. Rastgele titreşim analizi, izolatörlerin tasarımını ve etkinliğini değerlendirmek için gerçekçi zemin titreşimlerini kullanarak yapısal davranışın daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi açısından da önem arz etmektedir.



## KAYNAKLAR

- Ahmadi, G. (1979). Generation of artificial time histories compatible with given response spectra a review. *SM Archives*, 4 (3), 207-239.
- Allam, S. M., Datta, T. K. (1999). Seismic Behaviour of Cable-Stayed Bridges Under Multi Component Random Ground Motion. *Engineering Structures*, 22 (1), 62-74.
- Amin, M. and Ang, A.H.S. (1968). Nonstationary stochastic model of earthquake motions. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 94(2),559-583.
- Bycroft, G.N. (1960). White noise representation of earthquakes. *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 86(2), 1-16.
- Clough, R. W., Penzien, J. (1975). *Dynamics of Structures*. (1rd ed.). Singapore: McGraw-Hill, 634.
- Clough, R.W., Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures*. (2rd ed.). Singapore: McGraw-Hill, 738.
- Choi, I., Choun, Y., Ahn, S., Moon, S. (2010). Probabilistic seismic risk analysis of CANDU containment structure for near-fault earthquakes. *Nuclear Engineering and Design*, 238(6),1382-1391.
- Der Kiureghian, A., Neuenhofer, A. (1991). A response spectrum method for multiple-support seismic excitations. *Berkeley (CA): Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, California*, 66.
- Esfahani, H.M., Hejazi, F., Vaghei, R., Bin Jaafar, M.S., Karimzade, K. (2017). Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. *Structural Engineering International*, 27(1), 68-78.
- Galal, H., Gubarah, A. (2006). Effect of near-fault earthquakes on North American nuclear design spectra. *Nuclear Engineering and Design*, 236(18), 1928-1936.
- Ghiocel, D.M. (2009). *Seismic motion incoherency effects on soil-structure interaction (SSI) response of nuclear power plant buildings*. 10th International Conference in Structural Safety and Reliability, ICOSSAR, Osaka, Japan, 13-17.
- Ghiocel, D.M, Jang, Y.S., Lee, I.H. (August 20-25, 2017). *Understanding seismic motion incoherency modeling and effects on SSI and SSSI responses of nuclear structures*. SMiRT-24, Busan, South Korea, 3812-3837.
- Housner, G.W. (1955). Properties of strong motion earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 45 (3), 197-218.
- İnternet : PEER Ground Motion Database. URL: <https://ngawest2.berkeley.edu/> . Son Erişim Tarihi: 03.03.2024.

- Internet : ABAQUS Analysis User's Manual: Version 6.6, 23.6.2 Choosing a shell element.  
URL: <https://books.google.com.tr/books?id=gPdPvwEACAAJ>. Son Erişim Tarihi: 11.04.2024.
- Internet : ABAQUS Analysis User's Manual: Version 6.5, 2.4 Comparison of implicit and explicit-procedures.  
URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch02s04.html>. Son Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- Jin, S., Gong, J. (2020). Damage performance based seismic capacity and fragility analysis of existing concrete containment structure subjected to near fault ground motions. *Nuclear Engineering and Design*, 360(8), 110478.
- Kanai, K. (1957). Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35(2), 309-325.
- Labbe, P., Altinyollar, A. (2011). Conclusions of an IAEA–JRC research project on the safety significance of near-field seismic motions. *Nuclear Engineering and Design*, 241(5), 1842-1856.
- Lee, J. H. (2023). Earthquake response analysis of nuclear facilities subjected to incoherent seismic waves based on the random-vibration-theory methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107527.
- Lu, X., Lin, K., Cen, S., Xu, Z. and Lin, L. (2015). Comparing different fidelity models for the impact analysis of large commercial aircrafts on a containment building. *Engineering Failure Analysis*, 57, 254-269.
- Longjun, X., Yang, S., Xie, L. (2010). Response spectra for nuclear structures on rock sites considering the near-fault directivity effect. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(3), 357-365.
- Medel-Vera, C. and Ji, T. (2016). Seismic probabilistic risk analysis based on stochastic simulation of accelerograms for nuclear power plants in the UK. *Progress in Nuclear Energy*, 91, 373-388.
- Mena, A., Antonio, J. (2016). *Earthquake-Soil-Structure Interaction Modeling of Nuclear Power Plants for Near-Field Events*. Ph.D Thesis, University of California, Davis, 166.
- Pang, R., Zai, D., Xu, B., Liu, J., Zhao, C., Fan, Q. and Chen, Y. (2023). Stochastic dynamic and reliability analysis of AP1000 nuclear power plants via DPIM subjected to mainshock-aftershock sequences. *Reliability Engineering and System Safety*, 235, 109217.
- Rosenblueth, E. (1964). Probabilistic design to resist earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 90, 4090.

- Sadique, M.R., Iqbal, M.A. and Bhargava, P. (2013). Nuclear Containment Structure Subjected to Commercial and Fighter Aircraft Crash. *Nuclear Engineering and Design*, 260, 30-46.
- Soyluk, K. (1997). *Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 160.
- Soyluk, K. (2004). Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges. *Engineering Structures*, 26(11), 1573–1583.
- Soyluk, K., Sadegh-Azer, H. and Yılmaz, D. (July 10-15,2022). *Effects of near-fault ground motions on nuclear power plant containment structures*. 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin/Potsdam, 12.
- Soyluk, K., Sadegh-Azar, H., Yılmaz, D. (2023). Seismic response of nuclear containment structures due to recorded and simulated near – fault ground motions. *Structural Engineering and Mechanics*, 87(5), 431-450.
- Tajimi, H. (11-18 July 1960). *A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake*. Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, 781-798.
- Yousafzai, A.H. and Ahmadi, G. (1982). Deterministic And Stochastic Earthquake Response Analysis Of The Containment Shell Of A Nuclear Power Plant. *Nuclear Engineering and Design*, 72(3), 309-320.
- Zhai, C.H., Zheng, Z., Li, S. and Xie, L. (2015). Seismic analyses of a RCC building under mainshock-aftershock seismic sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74(2), 46-55.
- Zhou, Y., Jing, M., Pang, R., Xu, B., Jiang, F., Yu, X. (2021). Stochastic dynamic response and seismic reliability analysis of nuclear power plant’s vertical retaining wall based on plastic failure. *Structures*, 31(8), 513-539.
- Zhou, Y., Xu, B., Pang, R., Zou, D., Kong, X. (2018). Stochastic seismic response and stability reliability analysis of a vertical retaining wall in front of the pumping station of a nuclear power plant using the probability density evolution method. *Nuclear Engineering and Design*, 334(1), 110-120.
- Zin, R., Brede, P., Zentner, I., Wang, Z. (2017). *Probabilistic Analysis for NCOE Scenario Earthquake with Special Emphasis on Spatial Variation of Seismic Ground Motion*. SMiRT-24, Busan, South Korea, 2145-2154.
- Wung, C.D., Der Kiureghian, A. (1989). STOCAL-II: computer-assisted learning system for stochastic dynamic analysis of structures Part I. Theory and development. *Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley CA*.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*