ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Sajjad BAYRAMI

TABAN İZOLASYONLU ÇELİK ÇERÇEVELERİN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2018

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAN İZOLASYONLU ÇELİK ÇERÇEVELERİN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sajjad BAYRAMI

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 19/07/2018 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

Prof. Dr. Beytullah TEMEL DANIŞMAN	Prof. Dr. İsmail H. ÇAĞATAY ÜYE	Prof. Dr. H. Murat ARSLAN ÜYE
Prof.Dr. Faruk Fırat ÇALIM ÜYE	Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ ÜYE	

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2014-3054

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

TABAN İZOLASYONLU ÇELİK ÇERÇEVELERİN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sajjad BAYRAMI

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Beytullah TEMEL
Yıl: 2018, Sayfa: 171
Jüri : Prof. Dr. Beytullah TEMEL
: Prof. Dr. İsmail H. ÇAĞATAY
: Prof. Dr. H.Murat ARSLAN
: Prof. Dr. Faruk Fırat ÇALIM
: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak taban izolasyonlu çelik yapıların sismik davranışı araştırılmıştır. Yapısal modellerin sismik analizi için Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanan SAP2000 programı yardımıyla sayısal bir model geliştirilmiştir. Gerçekleşmiş olan sismik analizlerde, zemin, sismik izolatör, deprem ve üst yapı özelliklerinin yapı davranışları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapı-zemin etkileşimi analizi için direk analiz yöntemi kullanılmıştır. Analizler serbest titreşim analizi ve zorlanmış titreşim analizi olarak iki durumda gerçekleştirilmiştir. Sayısal integrasyon analiz yöntemini kullanarak zaman tanım alanında gerçekleşmiş olan zorlanmış titreşim analizlerinde, üstyapı ve sismik izolatörlerin davranışının nonlineer, zemin davranışının ise lineer olduğu kabul edilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, doğal serbest titreşim periyodu, rölatif deplasman ve taban kesme kuvveti gibi sismik davranış parametreleri incelenmiştir. Ayrıca sismik taban izolasyonu sisteminin performansını elde etmek için, izolatör performans faktörü tanımlanmış olup, bu faktörden yararlanarak değişik zemin tipleri için izolatörün performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sismik taban izolasyonlu binaların analizi ve tasarımında yapı-zemin etkileşimi etkisi konusununun yönetmeliklerde dikkate alınması için bir temel teşkil edebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapı-Zemin etkileşimi, Sismik izolasyon, Çelik yapı, Sismik analiz

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF THE SEISMIC BEHAVIOR OF BASE ISOLATED STEEL FRAMES CONSIDERING THE EFFECTS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION

Sajjad BAYRAMI

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor : Prof. Dr. Beytullah TEMEL
Year: 2018, Pages: 171
Jury : Prof. Dr. Beytullah TEMEL
: Prof. Dr. İsmail H. ÇAĞATAY
: Prof. Dr. H.Murat ARSLAN
: Prof. Dr. Faruk Fırat ÇALIM
: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

In this study, the effect of soil-structure interaction on the seismic behavior of base-insolated steel structures is investigated. A numerical model based on the Finite Element Method (FEM) has been developed using SAP2000 software for seismic analysis of structural models. In the seismic analysis, the effects of soil, seismic isolator, earthquake and superstructure characteristic on structural behavior are evaluated. The analysis are performed in two cases as free vibration analysis and forced vibration analysis. In the forced vibration analysis performed in the time domain using numerical integration analysis method, the behavior of the superstructure and seismic isolators are assumed to be nonlinear and the soil behavior is linear. According to the results obtained from the analysis, seismic behavior parameters such as natural free vibration period, relative displacement and base shear force are investigated. In addition, in order to obtain the performance of the seismic base isolation system, the isolator performance factor has been defined and the performance of the isolator for different soil types has been evaluated using this factor. Obtained results can be used as a basis for considering the effect of soil-structure interaction in the analysis and design of seismic base isolated buildings in design codes.

Key Words: Soil-Structure interaction, Seismic isolation, Steel structures, Seismic analysis

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Yapıların sismik davranışı, doğal titreşim periyodu, sönüm oranı, rijitlik ve süneklik gibi yapısal özellikler ve deprem özellikleri, binanın bulunduğu yerin jeolojik özellikleri ve zemin şartları gibi yapısal olmayan özelliklerden etkilenmektedir. Deprem bölgelerinde, yapı sismik davranışını iyileştirmek için, farklı aktif ve pasif yapısal sismik kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler yapıda, doğal serbest titreşim periyodu ve sönüm oranı gibi özellikleri değiştirerek yapı sismik davranışında pozitif bir etki sağlamaktadırlar. Sismik taban izolasyonu, deprem etkisinin yapıya aktarılmasını önlemek için geliştirilmiş olan pasif bir yapısal kontrol sistemidir. Bu sistemde temel ve zemin arasında belirli bir esnekliğe sahip elemanlar yerleştirilmektedir. Sismik taban izolasyonun tabanda oluşturduğu esneklik, yapının doğal serbest titreşim periyodlarının artmasını ve dolayısıyla yapıda oluşan atalet kuvvetlerinin azalmasını sağlamaktır. Yapı sismik davranışında diğer bir önemli etken ise, yapı-zemin etkileşimidir. Genelde yapıların sismik analizinde yapı tabanının rijit zemine oturduğu kabul edilmektedir. Ancak bu varsayım, her zaman geçerli değildir ve deprem esnasında yapı ve zemin bir sistemin bileşenleri olarak birbirinin davranışını etkileyebilmektedirler.

Sismik taban izolasyonu ve yapı-zemin etkileşiminin, yapı sismik davranışında önemli etkileri bulunduğu bilinen bir gerçektir. Ancak araştırılan literatür taramasından görülmektedir ki, yapı-zemin etkileşimi konusunda yapılan çalışmalar daha çok rijit tabanlı yapılar üzerine yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisine yönelik yapılan çalışmalar, genel olarak köprüler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bina tipi yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda üstyapı özelliklerine gereken değer verilmemektedir. Önceki çalışmalar daha çok tek serbestlik dereceli veya basit yapı modellerini içermektedir. Bu çalışmanın yazarının bilgisine göre, yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıların sismik davranışına etkisi konusunda kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada farklı tipte üstyapılar, sismik izolatörler, zemin özellikleri ve deprem ivme kayıtları dikkate alınarak, yapı-zemin etkileşimi etkisinde sismik taban izolasyonlu çelik çerçeve sistemlerinin sismik davranışı incelenmektedir. Çalışmada yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu üst yapının dinamik davranışına etkisi; örneğin, doğal titreşim periyodu, rölatif deplasman ve taban kesme kuvveti gibi davranış parametreleri incelenmekte olup, ayrıca zemin ve üstyapı özelliklerine göre sismik taban izolasyon sisteminin performansı değerlendirilecektir.

Yapısal modeller ile ilgili olarak, kat adeti ve yük taşıma sisteminin sismik davranışına etkileri incelenmektedir. Bu yüzden, 4, 6 ve 8 kat adetine sahip, moment aktaran ve merkezi çaprazlı olmak üzere toplam 6 adet yapı modeli kullanılmaktadır. Zemin özelliklerinin etkisini değerlendirmek için yumuşak, orta sertlikte ve sert olmak üzere, 3 zemin sınıfı analizlerde dikkate alınmaktadır. Deprem özellikleri ile ilgili olarak, bu çalışmada yapılan analizlerde Kobe ve El Centro depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmaktadır. Sismik analizler, dört aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir:

1) Taban izolasyonsuz yapısal modellerin sismik analizi
2) Taban izolasyonlu yapısal modellerin sismik analizi
3) Taban izolasyonsuz yapısal modellerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik analizi
4) Taban izolasyonlu yapısal modellerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik analizi

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşimi analizi için direk analiz yöntemi kullanılmaktadır. Analizler Sonlu Elemanlar yöntemine dayanan SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Sonlu elemanlar modelinde, yakın bölge zemin için 8 düğümlü Solid elemanı ile tanımlanmaktadır. Bu bölge geçirgen viskoz sınırlar ile uzak bölgeden ayrılmaktadır. Zemin davranışının lineer ve elastik olduğu kabul

edilmektedir. Üst yapı ile ilgili olarak Sonlu Eleman modelinde, kiriş ve kolon ve çaprazlar için 2 düğümlü Frame elemanı, döşemeler için 4 düğümlü Shell elemanı ve temel için 8 düğümlü Solid elemanı kullanılmaktadır. Elastomerik sismik izolatörler nonlineer İzolatör elemanı ile, temel ile zeminin ara bölgesinde bulunan bağlantı elemanları ise, nonlineer Gap elemanı ile modellenmektedirler. Üstyapı için Sonlu Eleman modelinde, çelik çerçeve sistemlerinin P-Δ ve büyük deformasyonlar etkisinde oluşan doğrusal olmayan (nonlineer) davranışa sahip oldukları kabul edilmektedir. Oluşturulan modele ait dinamik hareket denklemleri, zaman tanım alanında nonlineer analiz yapılarak çözülmekte olup, yapının sismik davranışı elde edilmektedir. Sismik analizler sayısal integrasyon yöntemini kullanarak gerçekleşmektedir. Analizlerde sistemin dinamik hareket denklemleri Hilber, Hughes ve Taylor α adım adım integrasyon yöntemi ile çözülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, sismik taban izolasyonu, önemli ölçüde yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodunu arttırmaktadır. Periyodun artışı sismik izolatörün rijitliği ile ters orantılıdır. İzolatörün rijitliği arttıkça, yapısal modelin doğal serbest titreşim periyodu düşmektedir. Ayrıca yapı-zemin etkileşimi, önemi ölçüde yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodunun arttırmaktadır. Ancak bu artış, sismik taban izolasyonlu modellerde oldukça düşüktür. Sismik izolasyonlu modellerin doğal serbest titreşim periyodu daha çok sismik izolatörün özelliklerinden etkilenmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin doğal serbest titreşim periyoduna etkisine yönelik yapılan incelemeler, üstyapı özelliklerinin bu konuda önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Üst yapı yatay rijitliği arttıkça (az katlı ve merkezi çaprazlı yapısal modellerde) yapı-zemin etkileşiminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi daha da önem kazanmaktadır. Sismik taban izolasyonlu modellerde zemin rijitliği düştükçe, yapı-zemin etkileşiminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi artmaktadır. Sismik izolatör rijitliği azaldıkça zeminin yapı doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi azalmaktadır. Sismik taban izolasyonlu modellerde, kat adeti arttıkça, zeminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi artmaktadır.

Zorlanmış titreşim analizi kısmından elde edilen sonuçlara göre, sismik taban izolasyonu sistemi, önemli ölçüde yapısal modellerde oluşan rölatif deplasmanı azaltmaktadır. Yapılan incelemeler sismik izolatörün bu konuda önemli bir etken olduğunu göstermektedir.Ayrıca üstyapı sistemi ve kat adeti de sistemde oluşan rölatif deplasmanı etkilemektedirler. Rölatif deplasmanın azalma oranı, yüksek katlı yapılarda daha büyükken, az katlı yapılar için bu oran azalmaktadır. Merkezi çaprazlı sistemlerdeki azalma oranı, moment aktaran sistemlere göre daha büyük olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Ayrıca yapı-zemin etkileşimi, sismik taban izolasyonsuz yapısal modellerde oluşan rölatif deplasmanı azaltmaktadır. Zemin rijitliğinin bu konuda önemli bir etken olduğu görülmektedir. Yumuşak zeminlerde azalma oranı daha büyük olup, sert zeminler için bu oran düşmektedir. Ayrıca üstyapı özellikleri de, yapıda oluşan rölatif deplasmanı etkilemektedirler. Yüksek rijitlik düzeyine sahip modeller, yani az katlı ve merkezi çaprazlı modeller zeminden daha fazla etkilenmekte olup, bu modellerdeki rölatif deplasman azalma oranı daha yüksektir.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışması süresince, çalışmalarıma yön veren, değerli katkılarını ve zamanını benden esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile bana yardımcı olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Beytullah TEMEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkılarıyla doktora eğitimi boyunca beni destekleyen Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü emekli öğretim üyesi sayın Prof. Dr. Ahmed Kamil TANRIKULU'ya ve bölüm hocalarına teşekkür ederim.

Çalışma boyunca sabır gösteren ve en sıkıntılı zamanlarımda manevi desteğini esirgemeyen eşim Ferzane'ye ve hayatıma farklı bir bakış açısı getiren kızım Elay'a teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında, desteklerini hiç esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET III
TEŞEKKÜR VII
İÇİNDEKİLER VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ XII
ŞEKİLLER DİZİNİ XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR XXVI
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 7
2.1. Yapı-Zemin Etkileşimi İle İlgili Yapılan Çalışmalar 7
2.2. Sismik Taban İzolasyonu İle İlgili Yapılan Çalışmalar 11
2.3. Yapı-Zemin Etkileşiminin Sismik Taban İzolasyonuna Etkisi Konusunda Yapılan Çalışmalar 12
3. MATERYAL VE METOD 19
4. YAPI- ZEMİN ETKİLEŞİMİ 23
4.1. Zeminde Dalga Yayılımı 23
4.2. Zemin Tepki Analizi 29
4.2.1. Tek Boyutlu Dalga Yayılımı ve Zemin Tepki Analizi 29
4.2.2. Zaman Tanım Alanında Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizi 30
4.2.3. Zaman Tanım Alanında İki ve Üç Boyutlu Zemin Tepki Analizi 32
4.3. Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi 32
4.3.1. Direk Yöntem 35
4.3.2. Altyapı Yöntemi 35
5. SİSMİK TABAN İZOLASYONU 41
5.1. Binaların Sismik Kontrolü 41
5.2. Sismik Taban İzolasyonu Sistemleri 41
5.2.1. Elastomerik Sismik İzolatörler 42

5.2.2. Kurşun Çekirdekli Elastomerik Sismik İzolatörler 42
5.2.3. Kayar Sarkaç Tipi Sismik İzolatörler 43
5.3. Sismik Taban İzolasyonunun Teorik Temeli 44
5.3.1. Lineer Teori 44
5.3.2. Çok Serbestlik Dereceli Sismik Taban İzolasyonlu Binaların Hareket Denklemleri 45
5.4. Elastomerik Sismik İzolatörlerin Mekanik Özellikleri 47
5.5. Sismik İzolatörlerin Bilineer Modeli 51
6. SAYISAL MODELLEME 53
6.1. Sonlu Eleman Modelinde Kullanılan Bileşenler 53
6.1.1. Üç Boyutlu Frame Elemanı 53
6.1.2. Üç Boyutlu Shell Elemanı 55
6.1.3. Solid Elemanı 56
6.1.4. Link Elemanı 57
6.1.4.1. Doğrusal Link Özelliği 58
6.1.4.2. Elastomerik İzolatör Özelliği 59
6.1.4.3. Gap Özelliği 60
6.2. Zaman Tanım Alanında Doğrusal (Lineer) Dinamik Analiz 61
6.2.1. Dinamik Hareket Denklemleri 61
6.2.2. Dinamik Hareket Denklemlerinin Çözümü 63
6.2.2.1. Mod Birleştirme Yöntemi 63
6.2.2.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri 65
6.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan (Nonlineer) Dinamik Analiz .72
6.3.1. Doğrusal Olmayan (Nonlineer) Modal Analiz veya Hızlı Nonlineer Analiz 73
6.3.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri 74
6.4. Sönüm Modelleri 75
6.5. SAP2000 Programı ile Yapı-Zemin Etkileşimi Analizi 76
6.5.1. Zemin Tepki Analizi 77

6.5.2. Yapı-Zemin Etkileşimi 77
6.5.3. Yapı-Zemin Etkileşimi Analizi İçin Viskoz Sınırların Tanımlanması 80
6.6. Sayısal Modellemenin Özeti 83
7. UYGULAMALAR VE ARAŞTIRMA BULGULARI 85
7.1. Uygulamada Kullanılan Yapısal Modeller 85
7.2. Zemin Tipleri ve Özellikleri 87
7.3. Elastomerik Sismik İzolatörlerin Özellikleri 88
7.4. Sonlu Eleman Modeli 90
7.5. Analiz Yöntemi 94
7.6. Serbest Titreşim Analizi 95
7.6.1. Zemin Serbest Titreşim Analizi 95
7.6.2. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınmadan Serbest Titreşim Analizi 97
7.6.3. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Serbest Titreşim Analizi .98
7.7. Zaman Tanım Alanında Zorlanmış Titreşim Analizi 104
7.7.1. Sismik Analizde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları 105
7.7.2. Deprem Hareketi Etkisinde Yapısal Modellerin Sismik Davranışı .109
7.7.2.1. Rölatif Deplasman 109
7.7.2.2. Taban Kesme Kuvveti 131
7.7.2.3. Sismik İzolasyon Sisteminin Performansı 152
7.7.3. Zemin Sonlu Eleman Modelinde Serbest Sınır Kullanılmasının Sismik Davranışa Etkisi 109
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 157
KAYNAKLAR 161
ÖZGEÇMİŞ 171

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 7.1. Yapısal modellerinin geometrik özellikleri 86
Çizelge 7.2. Yapısal modellerde kullanılan çelik malzeme özellikleri 86
Çizelge 7.3. Temel ve döşemelerde kullanılan betonun sınıfı ve özellikleri 87
Çizelge 7.4. Yapısal modellerde kullanılan çelik profiller 87
Çizelge 7.5. Zemin tipleri ve özellikleri 88
Çizelge 7.6. BI2 elastomerik sismik izolatörün mekanik özellikleri 89
Çizelge 7.7. BI3 elastomerik sismik izolatörün mekanik özellikleri 90
Çizelge 7.8. Viskoz geçirgen zemin sınırları için elde edilen sönüm katsayıları 92
Çizelge 7.9. Sap2000 analizinden ve teorik olarak elde edilen zemin doğal serbest titreşim periyodları 96
Çizelge 7.10. Yapı-zemin etkileşimi olmadan sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu yapısal modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodları 97
Çizelge 7.11. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu moment aktaran modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodu 99
Çizelge 7.12. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu moment aktaran modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodu 100
Çizelge 7.13. Sismik analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları 105

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 1.1. Sismik taban izolasyonunun rölatif deplasman üzerindeki etkisi 2
Şekil 1.2. Elastomerik sismik izolatör.....2
Şekil 1.3. Elastomerik sismik izolatörlerin çelik yapılardaki uygulam örnekleri.....3
Şekil 1.4. Çelik çerçeve sistemleri: (a) Moment aktaran çelik çerçeve sistemi, (b) Merkez çaprazlı çelik çerçeve sistemi.....5
Şekil 3.1. Zemin etkisi dikkate alınmadan sismik analiz aşamaları.....21
Şekil 3.2. Zemin etkisi dikkate alınarak sismik analiz aşamaları.....21
Şekil 4.1. Prizmatik küp elemanı üzerindeki gerilmeler.....24
Şekil 4.2. Zemin tepki analizinde kullanılan terimler.....29
Şekil 4.3. Lineer elastik zeminde tek boyutlu dalga yayılımı.....30
Şekil 4.4. Tek boyutlu zemin tepki analizi için kesme kiriş elemanı.....31
Şekil 4.5. SEY kullanarak zemin tepki analizi için kullanılan iki ve üç boyutlu yaklaşım (Datta, 2010).....32
Şekil 4.6. Kinematik yapı-zemin etkileşimi.....33
Şekil 4.7. Yapı-zemin etkileşiminin çözümü için şematik sonlu eleman modeli.....34
Şekil 4.8. Elastik yarı sonsuz uzay için zemin empedans fonksiyonları.....36
Şekil 4.9. Tek serbestlik dereceli sisteminm altyapı yöntemi için şematik gösterimi.....37
Şekil 5.1. Elastomerik sismik izolatör (Datta, 2010).....42
Şekil 5.2. Kurşun çekirdekli elastomerik sismik izolatör (Datta, 2010).....43
Şekil 5.3. Kayar sarkaç sismik izolatör.....43
Şekil 5.4. İki serbestlik dereceli sismik izolasyonlu sistemin şematik görünüşü.....44
Şekil 5.5. Dairesel elastomer tabaka için yüklenmiş ve yüklenmemiş alan.....49

Şekil 5.6. Elastomer tabakanın çelik tabakalar arasındaki basit eğilme durumu 50
Şekil 5.7. Sismik izolatör için kullanılan bilineer davranış modeli için kuvvet-deplasman eğrisi 51
Şekil 6.1. Yerel eksen takımında Frame elemanının uç kuvvetleri 54
Şekil 6.2. Üç boyutlu Shell elemanı 56
Şekil 6.3. Shell elemanının oluşumu 56
Şekil 6.4. Solid elemanının düğüm noktaları ve yüzeyleri 57
Şekil 6.5. İki boyutlu Link elemanının serbestlik dereceleri 58
Şekil 6.6. Elastomer izolatörün çift çizgili yük- deformasyon eğrisi 59
Şekil 6.7. Eksenel deformasyon için nonlineer Gap özelliği 61
Şekil 6.8. Şematik üç boyutlu yapı-zemin etkileşimi şematik modeli 78
Şekil 6.9. Birim küpe etki eden yükler 81
Şekil 6.10. Viskoz geçirgen sınırda tanımlanan sönüm elemanları 83
Şekil 7.1. Moment aktaran ve merkezi çaprazlı çelik yapı modelleri 85
Şekil 7.2. Elastomerik sismik izolatörlerin bilineer modeli 89
Şekil 7.3. Zemin sonlu eleman modeli 90
Şekil 7.4. Viskoz zemin sınırlarında tanımlanan sönüm elemanları 92
Şekil 7.5. Temel-zemin ara bölgesi için kullanılan Gap bağlantı elemanı 93
Şekil 7.6. Sap2000 Sonlu Eleman modeli 94
Şekil 7.7. Sap2000 analizinden ve teorik olarak elde edilen zemin doğal serbest titreşim periyodları 96
Şekil 7.8. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik izolatörlü ve sismik izolatörsüz modellerin şematik görünüşü 97
Şekil 7.9. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan yapısal modellerin kat adeti ve yük taşıma sistemine göre doğal serbest titreşim periyodlarının değişimi 98
Şekil 7.10. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik izolatörlü ve sismik izolatörsüz modellerin şematik görünüşü 99

Şekil 7.11. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi.....101
Şekil 7.12. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi.....101
Şekil 7.13. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF4 ve BF4 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi 102
Şekil 7.14. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF6 ve BF6 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi 103
Şekil 7.15. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF8 ve BF8 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi 103
Şekil 7.16. ELC depremi Elcentro istasyonu N180E ivme kaydı 105
Şekil 7.17. KOB depremi Japon meteoroloji istasyonu N00E ivme kaydı 106
Şekil 7.18. ELC depremi Fourier spektrumu grafiği.....108
Şekil 7.19. KOB depremi Fourier spektrumu grafiği.....108
Şekil 7.20. Rölatif deplasman (Δ) 109
Şekil 7.21. ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 110
Şekil 7.22. KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 111
Şekil 7.23. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....111
Şekil 7.24. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....112

Şekil 7.25. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....112
Şekil 7.26. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....113
Şekil 7.27. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....113
Şekil 7.28. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....114
Şekil 7.29. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....114
Şekil 7.30. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....115
Şekil 7.31. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....115

Şekil 7.32 Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi.....116
Şekil 7.33. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 117
Şekil 7.34. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 117
Şekil 7.35. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 118
Şekil 7.36. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 118
Şekil 7.37. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 119
Şekil 7.38. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 120
Şekil 7.39. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 120
Şekil 7.40. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 121

Şekil 7.41. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 121
Şekil 7.42. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 122
Şekil 7.43. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 122
Şekil 7.44. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi 123
Şekil 7.45. ELC depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen a oranı.....123
Şekil 7.46. KOB depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen a oranı.....124
Şekil 7.47. ELC depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen a oranı.....124
Şekil 7.48. KOB depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen a oranı.....125
Şekil 7.49. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz moment aktaran modellerde oluşan maksumum rölatif deplasmanın.....126
Şekil 7.50. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz moment aktaran modellerde oluşan maksumum rölatif deplasmanın.....126
Şekil 7.51. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksumum rölatif deplasmanın.....127

Şekil 7.52. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksumum rölatif deplasmanın.....127
Şekil 7.53. ELC depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen β oranı.....128
Şekil 7.54. KOB depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen β oranı.....129
Şekil 7.55. ELC depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen β oranı.....129
Şekil 7.56. KOB depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen β oranı.....130
Şekil 7.57. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....131
Şekil 7.58. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....132
Şekil 7.59. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....132
Şekil 7.60. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....133
Şekil 7.61. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....133

Şekil 7.62. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri 134
Şekil 7.63. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....134
Şekil 7.64. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....135
Şekil 7.65. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....135
Şekil 7.66. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....136
Şekil 7.67. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti 138
Şekil 7.68. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti 138
Şekil 7.69. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti 139
Şekil 7.70. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti 139

Şekil 7.71. ELC depremi etkisi altında; sismik taban taban izolasyonsuz MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....140
Şekil 7.72. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....140
Şekil 7.73. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....141
Şekil 7.74. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....141
Şekil 7.75. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....142
Şekil 7.76. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....142
Şekil 7.77. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....143
Şekil 7.78. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....143
Şekil 7.79. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....144

Şekil 7.80. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri.....144
Şekil 7.81. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman aman ile değişimleri.....145
Şekil 7.82. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetinin zaman ile değişimi 145
Şekil 7.83. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (ELC depremi).....146
Şekil 7.84. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (KOB depremi).....146
Şekil 7.85. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (ELC depremi).....147
Şekil 7.86. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (KOB depremi).....147
Şekil 7.87. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF4 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 148
Şekil 7.88. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF6 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 149
Şekil 7.89. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF8 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 149
Şekil 7.90. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF4 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 150

Şekil 7.91. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF6 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 150
Şekil 7.92. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF8 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi 151
Şekil 7.93. MF4 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 152
Şekil 7.94. MF6 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 153
Şekil 7.95. MF8 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 153
Şekil 7.96. BF4 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 154
Şekil 7.97. BF6 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 154
Şekil 7.98. BF8 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri 155
Şekil 7.99. Viskoz sınır ve serbest sınır durumlarında MF4 modeli için elde edilen rölatif deplasman 156
Şekil 7.100. Viskoz sınır ve serbest sınır durumlarında MF4 modeli için elde edilen taban kesme kuvveti 156

SİMGELER VE KISALTMALAR

SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi

MF : moment aktaran çerçeve

BF : merkezi çaprazlı çerçeve

CSI : Computers & Structures, Inc

HNA : hızlı nonlineer analiz

PGA : maksimum yer ivmesi

ELC : El Centro depremi

KOB : Kobe depremi

DSTP : doğal serbest titreşim periyodu

S-H : S dalgasının yatay bileşeni

S-V : S dalgasının düşey bileşeni

σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz} : normal gerilmeler

σ_{xy}, σ_{xz} , σ_{zy} : kayma gerilmeleri

ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{zz} : normal şekil değiştirme

$\bar{\varepsilon}$: hacimsel şekil değiştirme

τ : kayma açısı

ρ_{st} : çeliğin kütlesel yoğunluğu

ρ_{c} : betonun kütlesel yoğunluğu

ρ_{s} : zeminin kütlesel yoğunluğu

E : elastisite modülü

E_{st} : çeliğin elastisite modülü

E_{c} : beton elastisite modülü

E_s : zemin elastisite modülü

G : kayma modülü

G_s : zemin kayma modülü

G_e : elastomerin kayma modülü

t : zaman

u, v, w : x, y ve z yönündeki deplasman

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$: x, y ve z yönündeki hız

$\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}$: x, y ve z yönündeki ivme

$\ddot{u}_g$: zemin ivmesi

∂ : diferansiyel operatör

λ , μ : Lame katsayıları

∇^2 : Laplasyen operatörü

V_{P} : P dalgasının hızı

V_s : S dalgasının hızı

$\boldsymbol{M}$: kütle matrisi

$\boldsymbol{C}$: sönüm matrisi

$\boldsymbol{K}$: rijitlik matrisi

$\boldsymbol{V}$: deplasman vektörü

$\dot{\boldsymbol{V}}$: hız vektörü

$\ddot{\boldsymbol{V}}$: ivme vektörü

$\boldsymbol{I}$: etki vektörü

$\boldsymbol{G}_d(\omega)$: empedans fonksiyonu

a : boyutsuz frekans

ξ : sönüm oranı

ξ_s : zeminin sönüm oranı

ω : frekans

$\boldsymbol{K}_g(\omega)$: yapı-zemin sisteminin frekansa bağlı kompleks rijitlik matrisi

$\boldsymbol{d}(\omega)$: deplasman vektörünün kompleks frekans bileşenleri

$\ddot{u}_g(\omega)$: zemin ivmesinin kompleks frekans bileşeni

m : üstyapı kütlesi

m_b : izolasyon sisteminin üzerinde bulunan kütle

k_s : üstyapı rijitliği

k_b : izolasyon sisteminin rijitliği

c_s : üstyapı sönümü

c_b : izolasyon sisteminin sönümü

u_s : üstyapı deplasmanı

u_b : sismik izolasyon sisteminin deplasmanı

u_g : zeminin deplasmanı

v_b : izolatörün zemine göre deplasmanı

v_s : üstyapının izolatöre göre deplasmanı

$\dot{v}_b$: izolatörün zemine göre hızı

$\dot{v}_s$: üstyapının izolatöre göre hızı

$\ddot{v}_b$: izolatörün zemine göre ivmesi

$\ddot{v}_s$: üstyapının izolatöre göre ivmesi

$\mathbf{r}$: ilişki vektörü

K_H : elastomerik izolatörün yatay rijitliği

A : elastomerik izolatörün kesit alanı

t_r : elastomerin toplam kalınlığı

D : elastomerik izolatörün maksimum deplasmanını

K_V : elastomerik izolatörün düşey rijitliği

E_c : basınç modülü

S : elastomerik izolatörün şekil faktörü

R : elastomer tabakanın yarıçapı

d : elastomer tabakanın kalınlığı

EI : eğilme rijitliği

K_1 : sismik izolatörün elastik rijitliği

K_2 : sismik izolatörün akma sonrası rijitliği

Q : sismik izolatörün karakteristik dayanım

K_{eff} : sismik izolatörün etkin rijitliği

D_y : sismik izolatörün akma deplasmanını

W_D : tüketilmiş enerji

ξ_{eff} : sismik izolatörün etkin sönüm oranı

T_b : sismik izolasyonlu sistemin doğal serbest titreşim periyodu

$\mathbf{F_I}$: atalet kuvveti

$\mathbf{F_D}$: sönüm kuvveti

$\mathbf{F_R}$: elastik kuvvet

$\mathbf{f_i}$: Frame elemanının i ucundaki kuvvet vektörü

$\mathbf{f_j}$: Frame elemanının j ucundaki kuvvet vektörü

$\mathbf{k_i}$: Frame elemanının i ucuna göre elde edilin rijitlik vektörü

$\mathbf{k_j}$: Frame elemanının j ucuna göre elde edilin rijitlik vektörü

$\mathbf{d_i}$: Frame elemanının i ucundaki deformasyon vektörü

$\mathbf{d_j}$: Frame elemanının j ucundaki deformasyon vektörü

P : eksenel kuvvet

V_2 : 2 eksenine göre kesme kuvveti

V_3 : 3 eksenine göre kesme kuvveti

M_2 : 2 eksenine göre eğilme momenti

M_3 : 3 eksenine göre eğilme momenti

f_{u2}, f_{u3} : sismik izolatörün kesme kuvveti

r_2, r_3 : akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe göre oranı

k_2, k_3 : sismik izolatörün 2 ve 3 yönündeki elastik rijitliği

P_g : Gap elemanında oluşan kuvvet

d_g : Gap elemanında oluşan deplasman

$\mathbf{F}(t)_I$: düğüm noktalarında oluşan atalet kuvvetleri vektörü

$\mathbf{F}(t)_D$: viskoz sönüm kuvvetleri vektörünü

$\mathbf{F}(t)_S$: iç kuvvetle vektörü

$\mathbf{F}(t)$: dış yükler vektörü

$\ddot{\mathbf{u}}(t)_a$: düğüm noktalarında oluşan mutlak ivme

$\dot{\mathbf{u}}(t)_a$: düğüm noktalarında oluşan mutlak hız

$\mathbf{u}(t)_a$: düğüm noktalarında oluşan mutlak deplasman

$u(t)_{ig}$: serbest zemin deplasmanı

$u(t)_{xg}$: serbest zemin deplasmanı x bileşeni

$u(t)_{yg}$: serbest zemin deplasmanı y bileşeni

$u(t)_{zg}$: serbest zemin deplasmanı z bileşeni

$\mathbf{I}_x$, $\mathbf{I}_y$, $\mathbf{I}_z$: birim matris

$\mathbf{u}(t)$: serbest zemine göre deplasman vektörü

$\dot{\mathbf{u}}(t)$: serbest zemine göre hız vektörü

$\ddot{\mathbf{u}}(t)$: serbest zemine göre ivme vektörü

$\boldsymbol{\Phi}$: mod vektörlerini içeren modal matris

$\mathbf{Y}(t)$: zaman fonksiyonlarının içeren vektör

$\boldsymbol{\omega_i}$: frekans

$\bar{\mathbf{K}}$: efektif dinamik rijitlik matrisidir

Δt : zaman adımı

$\mathbf{R}(t)_{\mathrm{NL}}$: toplam nonlineer kuvvetler vektörü

$\bar{\mathbf{K}}$: elastik rijitlik matrisi

$\bar{\mathbf{R}}(t)$: efektif dış yükler

$\boldsymbol{\Phi}$: Ritz vektörü

$\mathbf{C}$: Rayleigh sönümü

η : Rayleigh sönüm modelinde kütle katkı katsayısı

δ : Rayleigh sönüm modelinde rijitlik katkı katsayısı

M_e : depremin büyüklüğü

D_e : deprem istasyonunun mesafesi

$x(t)$: zaman tanım alanında yer hareketi

F_{yst} : çelik akma mukavemeti

F_{ust} : çelik kopma mukavemeti

w_{st} : çeliğin birim ağırlığı

w_c : beton birim ağırlığı

w_s : zeminin birim ağırlığı

f_{ck} : beton 28 günlük karakteristik dayanımı

ν_c : betonun Poisson oranını

V_s : S dalgası yayılma hızı

G_s : Zeminin kayma modülü

E_s : zeminin elastisite modülü

ν_{st} : çelik Poisson oranı

ν_s : zeminin Poisson oranını

ν_c : betonun Poisson oranını

g : yerçekimi ivmesi

T : doğal serbest titreşim periyodu

T_b : sismik taban izolasyonlu yapının doğal serbest titreşim periyodu

T_s : zemin doğal serbest titreşim periyodu

T_{si} : yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yapının doğal serbest titreşim periyodu

Ω : kayma dalgasının boyu

ω_s : zemin doğal serbest titreşim frekansı

T_s : zemin doğal serbest titreşim periyodu

c_v : viskoz geçirgen sınırda yüzeye paralel sönüm katsayısı

c_h : viskoz geçirgen sınırda yüzeye dik sönüm katsayısı

H_s : yakın bölge zeminin derinliği

Δ : rölatif deplasman

Δ_{BS} : yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik taban izolasyonlu modelde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

Δ_B : yapı-zemin etkileşimi olmadan sismik taban izolasyonlu modelde oluşan maksimum rölatif deplasmana

β : rölatif deplasman oranı

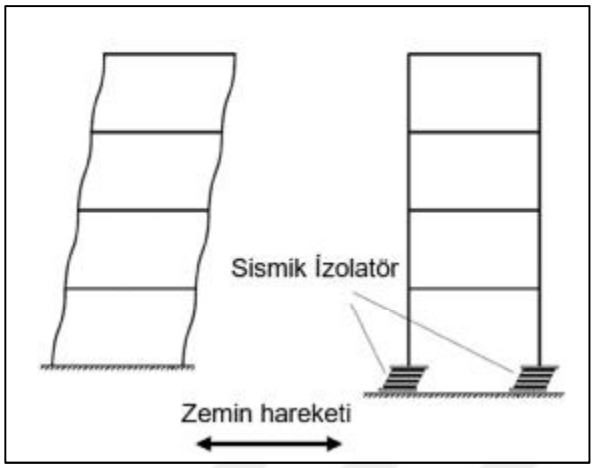
V	: taban kesme kuvveti
V_s	: yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak, yapıda oluşan maksimum taban kuvvetinin
V_b	: yapı-zemin etkileşimi olmadan oluşan maksimum taban kesme kuvveti
Π	: taban kesme kuvveti oranı
PF	: sismik izolasyon sisteminin performans faktörü
a_h	: sismik izolatör olmadan yapının uç noktasında oluşan maksimum ivme
a'_h	: sismik izolatörlü yapının uç noktasında oluşan maksimum ivme

1. GİRİŞ

Yapıların depremden kaynaklanan yüklere karşı gösterdiği sismik davranış, yapısal ve yapısal olmayan farklı özelliklerden etkilenmektedir. Özellikle doğal titreşim periyodu, sönüm oranı, rijitlik ve süneklik gibi yapısal özellikler ve deprem özellikleri, binanın bulunduğu yerin jeolojik özellikleri ve zemin şartları gibi yapısal olmayan özellikler yapı sismik davranışında önemli etkenler olarak tanımlanmaktadırlar.

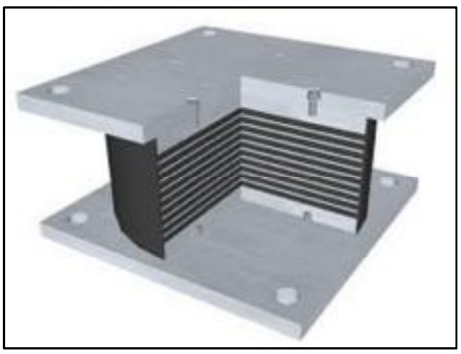
Deprem bölgelerinde, yapı sismik davranışını iyileştirmek ve depremin yapı üzerindeki etkisini azaltmak için farklı aktif ve pasif yapısal sismik kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler yapıda, doğal serbest titreşim periyodu ve sönüm oranı gibi özellikleri değiştirerek yapı sismik davranışında pozitif bir etki sağlamaktadırlar. Sismik taban izolasyonu deprem etkisinin yapıya aktarılmasını önlemek için geliştirilmiş olan pasif bir yapısal kontrol sistemidir. Bu sistemde temel ve zemin arasında belirli bir esnekliğe sahip elemanlar yerleştirilmektedir. Sismik taban izolasyonun tabanda oluşturduğu esneklik yapının doğal serbest titreşim periyodlarının artmasını ve dolaysıyla yapıda oluşan atalet kuvvetlerinin azalmasını sağlamaktır. Ayrıca Şekil 1.1’ de görüldüğü gibi sismik izolasyon yapıların hasar görmesinde önemli bir etken olarak tanımlanan rölatif deplasmanların azalmasına neden olmaktadır.

Sismik taban izolasyonu sistemleri genel olarak elastomer esaslı ve sürtünme esaslı olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Elastomerik sismik izolatörler, en popüler izolasyonu sistemleri olarak tanımlanmaktadırlar. Elastomerik sistemler düşey yükleri taşımak için düşey yönde çok rijit ve depremden kaynaklanan yatay titreşimleri yalıtmaya yönelik yatay yönde esnek yapıya sahipler. Elastomerik sismik izolatörlerin en önemli mekanik özelliği yatay rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Yatay rijitlik elastomerin kayma modülü, kesit alanı ve toplam kalınlığına göre belirlenmektedir.



Şekil 1.1. Sismik taban izolasyonunun rölatif deplasman üzerindeki etkisi

Elastomerik sismik izolasyon sistemleri Şekil 1.2'de gösterildiği gibi genelde çelik ve kauçuktan oluşan katmanlı bir yapıya sahipler. Çelik tabakalar izolatörün düşey yöndeki rijitliğini, elastomer tabakalar ise yatay yöndeki esnekliği sağlamaktadırlar.



Şekil 1.2. Elastomerik sismik izolatör

Elastomerik sismik taban izolatörlerinin çelik yapılardaki uygulamalarından bazı örnekler Şekil 1.3'te verilmektedir.



Şekil 1.3. Elastomerik sismik izolatörlerin çelik yapılardaki uygulama örnekleri

Yapı sismik davranışında diğer bir önemli etken ise yapı-zemin etkileşimidir. Genelde yapıların sismik analizinde yapı tabanının rijit zemine oturduğu kabul edilmektedir. Ancak bu varsayım her zaman geçerli değildir ve deprem tahriki esnasında yapı ve zemin bir sistemin bileşenleri olarak birbirinin davranışını etkileyebilmektedirler. Yapı mühendisliğinde yapı-zemin etkileşimi, zeminin üstyapı üzerindeki etkisi konusunu kapsamaktadır.

Yapı-zemin etkileşimi konusu ile ilgili gerçekleşen araştırmalar, gevşek zeminlerde, etkileşimin üstyapı üzerindeki etkisinin önemli olduğunu ve bu etkinin katı ve sert zeminlerde daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu yüzden yapı analizlerinde rijit taban bağlantısı varsayımı katı zemine oturan yapılarda gerçekçi bir yaklaşımdır ve yumuşak zeminlerde etkileşimin dikkate alınması önem taşımaktadır. Ayrıca bu araştırmalar, yapı-zemin etkileşiminin önemli ölçüde üstyapı ve deprem özelliklerinden de etkilenebileceğini göstermiştir. Özellikle üstyapının zemine göre rijitlik oranı yapı-zemin etkileşimi analizinde dikkate alınması gereken bir konudur.

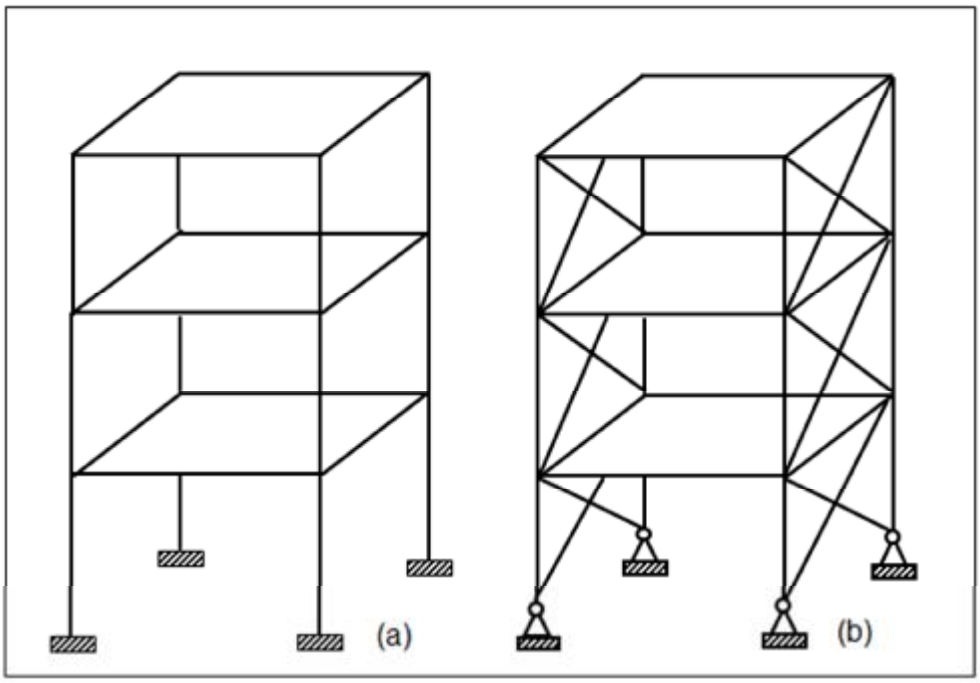
Yapı-zemin etkileşimi ve sismik taban izolasyonunun yapı sismik davranışında önemli etkileri oluğu ve yapının dinamik özelliklerini değiştirdikleri bilinmektedir. Ancak sismik taban izolasyonu konusunda yapılmış olan çalışmaların çoğunda yapının rijit bir ortam üzerinde oturduğu varsayılmıştır ve

yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisi konusuna gereken önem verilmemektedir. Son yıllarda depreme dayanıklı yapı tasarımı yöntemlerinin gelişmesi ile beraber yapı-zemin etkileşimi konusuna FEMA 356(2004), FEMA 450(2010) ve ASCI/SEI 7-10(2010) gibi bazı yönetmeliklerde önem verilmektedir. Ancak sismik taban izolasyon sistemleri ile ilgili analiz ve tasarım yöntemleri genelde, taban izolasyon sisteminin rijit bağlantılı olduğu esas alınarak geliştirilmiş olup ve zemin etkileri göz ardı edilmektedir.

Bu doktora tezi kapsamında yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak elastomerik sismik taban izolasyonlu çelik yapı sistemlerinin sismik davranışının incelenmesi amaçlanmış olup, literatürde ve tasarım yöntemlerindeki bu eksikliğin bir ölçüde giderilmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın asıl amacı özet olarak aşağıda verilmektedir:

- Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu üst yapının dinamik davranışına etkisi; örneğin, doğal titreşim periyodu, rölatif deplasman ve taban kesme kuvveti gibi davranış parametreleri incelenecektir.
- Zemin ve üstyapı özelliklerine göre sismik taban izolasyon sisteminin performansı değerlendirilecektir.

Çalışmada ayrıca farklı zemin ve üstyapı özellikleri de dikkate alınmaktadır. Üstyapı özelliklerinin etkisini incelemek için değişik kat adeti ve yük taşıma sistemlerine sahip üç boyutlu çelik yapı modelleri incelenmektedir. Yapısal modeller Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, moment aktaran ve merkezi çaprazlı olmak üzere iki tipten oluşmaktadırlar. Modeller her iki yönde aynı yük taşıma sistemine sahipler. Moment aktaran çelik yapı sistemlerinde kolon-kiriş bağlantısının rijit olduğu ve yük etkisinde elemanların arasındaki açının değişmediği kabul edilmektedir. Bu sistemlerde, depremden kaynaklanan yükler, yapısal elemanlar ve düğüm noktalarında oluşan eğilme momentleri ile taşınmaktadır.



Şekil 1.4. Çelik çerçeve sistemleri: (a) Moment aktaran çelik çerçeve sistemi, (b) Merkez çaprazlı çelik çerçeve sistemi

Moment aktaran çelik yapı sistemleri, merkez çaprazlı sistemlere göre düşük rijitlik ve yüksek süneklik kapasitesine sahipler. Bu yüzden yüksek sismik aktiviteli bölgelerde yaygın şekilde kullanılmaktadırlar.

Zemin özellikleri ile ilgili olarak sismik analizlerde üç tip zemin özelliği kullanılmaktadır. Bilindiği gibi kayma dalgasının zemin ortamında yayılma hızı, zemin rijitliğinin bir göstergesidir. Kullanılan zemin modelleri farklı kayma dalgası hızına sahiptirler ve yumuşak, orta ve sert bir zemin ortamını temsil etmektedirler.

Ülkemizin çok aktif bir deprem bölgesinde yer aldığı bilinen bir gerçektir. Bu tez çalışmasından elde edilecek sonuçlar, binaların deprem davranışlarının iyileştirilmesi ve depreme karşı daha güvenli yapılar oluşturulması bakımından önemli bir veri sağlayacaktır. Çalışmadan elde edilecek bulguların, Türk Deprem Yönetmeliğinde eksik olan, binaların analiz ve tasarımında yapı-zemin

etkileşiminin dikkate alınması ve taban izolasyonu ile ilgili konuların, yönetmeliğe eklenmesinde bir temel teşkil edebileceği düşünülmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez konusu ile ilgili gerçekleştirilmiş olan önemli çalışmalar bu bölümde sunulacaktır. Literatür taramasında yapı-zemin etkileşimi, sismik taban izolasyonu ve yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapıların üzerindeki etkisi konularını içeren araştırmalara yer verilmektedir.

2.1. Yapı-Zemin Etkileşimi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Yapı-zemin etkileşimi alanında yapılan çalışmalar genelde analitik, sayısal ve deneysel yöntemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar dinamik deney kutusu kullanılarak sarsma tablası üzerinde yapılmaktadır. Turan ve ark. (2009), Chau ve ark. (2009), Chen ve ark. (2010), Gao ve ark. (2011), Massimino ve ark. (2013), Wang ve ark. (2011), yapı-zemin etkileşimi ile ilgili önemli deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Sayısal çalışmaların çoğunda, zemin ve zeminin sınır koşullarının modellenmesi önemli bir konu olarak ele alınmaktadır. Zemin ortamını yay kullanarak modellemek en basit modelleme yöntemi olarak araştırmacılar tarafından uygulanmaktadır. Dutta ve Roy (2002), Makris ve Gazetas (1992), Gerolymos ve Gazetas (2006) ve Raychowdhury ve Singh (2012), çalışmalarından zemin modellemesi için Winkler yay modelini kullanmışlardır. Ancak yapı-zemin etkileşimi çalışmalarında zemin davranışını detaylı olarak ele almak için zemin için sürekli bir model tanımlamak önem taşımaktadır. Bu yüzden Solu Elemanlar Yöntemi ve Sınır Eleman Yöntemi ve Sonlu Eleman-Sınır Eleman birleşik yöntemi gibi yöntemler araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

Temel (1996), dinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerinin Sonlu-Sonsuz Elemanlar ve Laplace dönüşüm yöntemi ile analizi konusunda bir çalışma yapmıştır. Söz konusu çalışmada, iki boyutlu veya eksenel dönel simetrik yapı-zemin etkileşimi problemleri, yakın bölgelerde standart Sonlu ve uzak bölgelerde Sonsuz Eleman kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde statik, harmonik ve keyfi

yükleme durumları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Fortran dili ile yazılan özel bir programla gerçekleşen analizler, sonsuza uzanan zemin ortamında, Sonlu-Sonsuz eleman kullanımının, viskoz sınırlar ile çözüme göre daha etkin olduğunu göstermiştir.

Yerli (1998), iki ve üç boyutlu dinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerinin Sonlu ve Sonsuz elemanlar kullanarak analizi konusunda bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, iki ve üç boyutlu elastodinamik yapı-zemin etkileşimi problemleri için, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayanan bir model önerilmiştir. Modelde, kaynağa yakın bölgeler için Sonlu Elemanlar, sonsuza uzanan bölgeler için ise, birden fazla dalga tipini içerebilen Sonsuz Elemanlar kullanılmıştır.

Bhattacharya ve Dutta (2004) yapı-zemin etkileşiminin binaların doğal serbest titreşim periyotları üzerindeki etkisine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Balkaya ve ark. (2012) tarafından gerçekleşen bir çalışmada SEY'ni kullanarak perdeli yapıların yapı-zemin etkileşimi etkisinde davranışları incelenmiştir. Nateghi ve ark. (2013), yapı-zemin etkileşiminin çok katlı yapıların nonlineer dinamik davranışına etkisine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Renzi ve ark.(2013) tarafından yapılan bir çalışmada üstyapı-zemin rijitlik oranını, doğal serbest titreşim periyotu uzamasında önemli bir etken olarak tanımlanmıştır. Tüm bu çalışmalar, üstyapı serbest titreşim periyotunun yapı-zemin etkileşimi analizinde önemli bir etken olduğunu göstermiştir.

Raychowdhury (2011), yapmış olduğu bir analitik çalışmada, nonlineer yapı-zemin etkileşiminin az katlı moment dayanımlı çelik yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada rijit, elastik ve nonlineer zemin şartları dikkate alınmıştır ve sismik analizler üç durumda OpenSees hazır paket programı ile gerçekleşmiştir. Elde edilen modal analiz sonuçları, yapı-zemin etkileşiminin birinci modda etkili olduğunu ve diğer modlar üzerindeki etkisinin düşük olduğunu, elastik ve nonlineer zemin durumları için doğal serbest titreşim periyodunun aynı olduğunu göstermiştir. Ayrıca taban kesme kuvvetinin nonlineer

zemin durumunda rijit ve elastik durumlara göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Saez ve ark. (2013), çalışmalarında elastik olmayan yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak moment dayanımlı betonarme yapı sistemlerinin sismik sismik davranışlarını teorik olarak araştırmışlardır. Modelleme iki boyutlu olarak SEY ile yapılmıştır. Çalışmada kuru ve tam doymuş kum zemin özellikleri dikkate alınmıştır. Değişik deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan sismik yapı-zemin etkileşimi analizlerinde, kuru zemin durumu için yapı sismik cevabının düzensiz ve değişken olduğu ve doymuş zemin durumunda etkileşimin ihmal edilebileceği sonucu elde edilmiştir.

Hokmabadi ve ark. (2014), zemin-kazık-yapı etkileşimini dikkate alarak orta yüksekliğe sahip yapıların sismik davranışlarını incelemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. Deneysel ve analitik olarak yapılan çalışmada üç durum dikkate alınmıştır. Birinci durumda yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmiştir. Diğer iki durumda yüzeysel ve kazık temel tipleri yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak kullanılmıştır. Deneysel çalışma sarsma tablası ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın analitik kısmı için üç boyutlu nonlineer dinamik analiz yapabilen bir hazır paket yazılımı kullanılmıştır. Sonuçta yapı-zemin etkileşiminin yanal deplasman ve periyod miktarının artmasına neden olduğu ve kazık temel durumunda yüzeysel temel durumuna göre etkileşim etkisinin daha düşük olduğu ve yanal deplasmanların azalması tespit edilmiştir.

Farghali ve Ahmed (2013), çalışmalarında yapıların sismik davranışlarını yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak araştırmışlardır. Analizler SAP2000 hazır paket programını kullanarak gerçekleştirilmiştir ve üç boyutlu nonlineer zemin-temel-yapı modelinin çözümü için zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşimi etkisinde olan yapılarda rijit tabanlı yapılara göre deplasman ve periyot değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Tabatabaiefar ve ark. (2013), moment dayanımlı betonarme çerçevelerin sismik davranışlarını yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada 10 katlı bir moment dayanımlı betonarme model dikkate alınmıştır ve değişik zemin durumları için sismik analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığı zaman, taban kesme kuvvetinin rijit tabanlı yapıya göre daha düşük olduğu ve bazı zemin şartlarında yapı performans seviyesinin değiştiğini göstermiştir.

Xue ve ark. (2015), tek cidarlı çelik uzay kafes yapı sistemlerinin dinamik performansını, kazık-yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak araştırmışlardır. Araştırma, SEY kullanılarak ABAQUS hazır paket programı ile yapılmıştır. Üç boyutlu Sonlu Eleman modelinde zemin yapay sınırları için viskoelastik sınırlar tanımlanmıştır ve değişik deprem ivme kayıtları etkisinde sismik analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşimi etkisinde, yapının doğal titreşim frekanslarının azalmasını ve düğüm noktalarına oluşan deplasman ve ivme değerlerinin artmasını göstermiştir.

Tasarım standartlarında yapı-zemin etkileşiminin yapı tasarımında dikkate alınması konusuna gereken önem verilmemesine rağmen, bu konu bazı standartlarda dikkate alınmaktadır. Eurocode 8, EN 1998-1 (2004), ikinci derce etkilerin (p-δ) önemli olduğu yapılarda, yüksek yapılarda, yumuşak zeminlerde ve kazık temel gibi derin temellerin kullanılması durumunda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasını tavsiye etmektedir. Ancak söz konusu standartta yapı-zemin etkileşiminin analizlerde dikkate alınması için herhangi bir öneri ve hesap yöntemi verilmemektedir. ASCE 7-05 (2006) de yapı zemin etkileşiminin etkisi rijit tabanlı yapı için elde edilen sonuçları modifiye edilerek dikkate alınmaktadır. ASCE 7-05 (2006) ve FEMA 450 (2003), modifiye edilmiş serbest titreşim periyotu ve sönüm oranını dikkate alarak yapı-zemin etkileşimi etkisinde yapının taban kesme kuvvetinin azalmasına izin vermektedir. FEMA 440 (2005) yapıya etki eden deprem hareketinin modifiye edilmesi ile ilgili bazı prensipler sunulmaktadır. Bu prensipler FEMA 356 (2000) ve ATC 40 (1996)' ta verilmiş öneriler ile birlikte

kullanılabilmektedir. Bu öneriler kinematik etkileşim ve zeminin sönümü etkisinde yapıdaki titreşimin azalmasına yönelik verilmektedirler.

2.2. Sismik Taban İzolasyonu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Wu ve Samali (2002), taban izolasyonlu çelik yapıların sismik davranışını deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Çalışama elastomerik izolatör ile izole edilmiş beş katlı bir çelik yapı modeli dikkate alınmıştır. Sarsma tablası testleri ve numerik analizler, Northridge (1994), Hachinohe (1968), El-Centro (1940) ve Kobe (1950) depremleri etkisi altında yapılmıştır. Yapılmış olan testlerde ve analizlerde modelin doğal titreşim frekansları, sönüm oranı ve mod şekillerinin yanı sıra kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri de elde edilmiştir. Sonuçlar, izolasyon sistemi etkinliğinin deprem hareketine bağlı olduğunu göstermiştir. Maksimum ivme, deplasman, kat ötelemesi ve taban kesme kuvveti dikkate alınarak Northridge (1994), Hachinohe (1968) ve Kobe (1950) depremleri etkisi altında izolasyon sisteminin etkili olduğu ancak El-Centro 1940 depreminde izolasyon sisteminin etkisinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Kang ve ark. (2009), taban izolasyonlu binaların sismik davranışını elde etmek için bir analitik araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada çelik ve fiber ile güçlendirilmiş olan iki çeşit elastomerik sismik izolatör kullanılmıştır. Söz konusu izolatörlerin yatay ve düşey rijitlik gibi mekanik özellikleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Yapısal model için rölatif deplasman, kat ötelemesi ve ivme değerleri, zaman tanım alanında çözüm yöntemini kullanarak elde edilmiştir. Sonuçlar, fiber ile güçlendirilmiş olan elastomerik izolatörlerin daha etkili olduğunu göstermiştir. Wang ve ark. (2012), taban izolasyonlu ve ara kat izolasyonlu binaların sismik davranışı üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada iki yaklaşımın, yapının sismik davranışındaki etkisi değerlendirilmiştir. Sarsma tablası deneyleri, ara kat izolasyonlu yapının taban izolasyonlu yapıya göre doğal titreşim frekansı ve sönüm oranı gibi değerlerinin daha düşük olduğunu göstermiştir.

Oh ve ark. (2013), histerik U şeklindeki sönüm elemanları ile donatılmış elastomerik izolatörlerin yapıların sismik performansına etkisine yönelik bir deneysel araştırma yapmışlardır. Araştırmada sarsma tablası deneylerinden yararlanarak sismik testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sönüm elemanlı sismik taban izolasyonlu binaların sismik performansının, sönüm elemanı olmayan sismik izolasyonlu binalara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Matsagar ve ark. (2004), sismik izolatör özelliklerinin çok katlı taban izolasyonlu yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisine yönelik bir analitik çalışma yapmışlardır. Çalışmada sismik izolatör için bilineer histerik ve lineer elastik-viskoz olmak üzere iki alternatif matematiksel model kullanılmıştır. Sistemin hareket denklemleri Newmark direk integrasyon yöntemini kullanarak çözülmüştür. İki durum için elde edilen ivme ve deplasman değerleri karşılaştırılmıştır ve lineer elastik viskoz durumunda üstyapıda oluşan ivmenin bilineer histerik duruma göre daha düşük olduğu ve izolatör deplasmanının lineer elastik viskoz durumunda daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir.

2.3. Yapı-Zemin Etkileşiminin Sismik Taban İzolasyonlu Yapılara Etkisi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Konu ile ilgili yapılan literatür taraması, yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıların üzerindeki etkisine yönelik çalışmaların az sayıda olduğunu ve bu çalışmaların genelde sismik izolasyonlu köprüler üzerinde yapıldığını göstermektedir. Spyrakos ve Vlassis (2001) ve Vlassis ve Spyrakos (2001) yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu köprülerin sismik davranışları üzerindeki etkisini analitik yöntemler ile araştırmışlardır. Araştırma sonuçları yapı-zemin etkileşiminin sistemin frekanslarının önemli ölçüde etkilediği ve bu frekansların rijit tabanlı yapıya göre azaldığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca yapı-zemin etkileşiminin taban kesme kuvvetinin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Soneji ve Jangid (2008), dinamik yapı-zemin etkileşiminin, sismik izolasyonlu kablolu köprülerinin davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmeye yönelik bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada yapı-zemin etkileşiminin etkisi zaman tanım alanında ve direk integralleme yöntemini kullanarak elde edilmiştir. Sonuçlar, yapı-zemin etkileşiminin sismik izolasyonlu köprülerin sismik tepkisi üzerinde önemli etkileri olduğu ve özellikle yumuşak zeminlerde bu etkinin dikkate alınması gerekliğini göstermiştir.

Stehmeyer ve Rizos (2008), çalışmalarında dinamik yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu köprülerin sismik davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, yapı ve etrafındaki zemin basit bir numerik model yardımıyla modellenmiştir. Sınır ve Sonlu Elemanlar bileşik yöntemi ile çözüm yapılmıştır. Sonuçta yapı-zemin etkileşiminin izolasyonlu sistemin etkilemesi ve belli bir zemin-yapı rölatif rijitlik miktarından sonra izolasyonun sistem üzerinde etkisinin azalması tespit edilmiştir.

Alam ve Bhuiyan (2013), tarafından yapılan bir numerik çalışmada sismik izolasyonlu otoyol köprülerinin sismik davranışı yapı-zemin etkileşimi etkisi altında incelenmiştir. Sismik analiz zaman tanım alanında gerçekleştirilmiştir ve üstyapı ve elastomerik sismik izolatörlerin nonlineer davranışı dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları, sert zemin üzerine oturan sismik izolasyonlu köprülerin sismik analizinde yapı-zemin etkileşimi etkilerinin ihmal edilebileceğini, ancak yumuşak zemin koşullarında yapılan köprüler için bu etkilerin önemli olduğunu göstermiştir.

Forcellini (2017), yapmış olduğu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu köprülerin üzerinde etkisini araştırmıştır. Çalışma, SEY'ni kullanan Opensees yazılımı ile gerçekleşmiştir.

Cho ve ark. (2004) ve Kim ve ark. (2002) sismik taban izolasyonlu sıvı depolama tanklarının sıvı-yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak sismik analizine yönelik bir çalışama yapmışlardır. Modellemede, Sonlu ve Sınır elamanlar yönteminden yararlanmıştır ve zaman tanım alanında çözüm yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan tankın radyal deplasmanlar ve maksimum

kuvvetlerin zemin sertliğinden etkilendiği, ancak bu etkilerin taban izolasyonlu yapılarda izolasyonsuz yapılara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Spyrakos ve ark. (2009a), yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıların sismik davranışındaki etkisine yönelik numerik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada hareket denklemleri frekans alanında çözülerek sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçta taban izolasyonlu yapının, yapı-zemin etkileşiminden etkilendiği ve sistemin modal özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir.

Haiyang ve ark. (2014), yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıların sismik davranışındaki etkisinin araştırmak için bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sarsma tablası kullanarak küçük ölçekli yapısal modeller üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşimi etkisinde sismik izolasyonlu yapının doğal serbest titreşim frekansı gibi özelliklerinin değiştiğini göstermiştir.

Krishnamoorthy ve Anita (2016), SEY'ni kullanarak kayar sarkaç sismik izolasyonlu yapıların yapı-zemin etkileşimi altında sismik davranışına yönelik bir araştırma geçekleştirmişlerdir. Sismik analizler frekans alanında yapılmıştır. Analizlerde zemin rijitliği, deprem özellikleri, yapının kat adeti gibi etkenler dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, taban izolasyonlu yapıların yapı-zemin etkileşimi etkisindeki sismik davranışının önemli ölçüde deprem özelliklerinden etkilendiğini ve yapı-zemin etkileşiminin yakın bölge depremlerde zararlı, uzak bölge depremlerde ise yararlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca kat adetinin önemli bir etken olduğu ve kat adeti arttıkça yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıyı daha az etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

Drosos ve ark. (2015), yapı-zemin etkileşiminin sismik izolasyonlu nükleer santrallerin sismik davranışındaki etkisine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada, yapı-zemin etkileşimi analiz için Direk analiz yöntemi kullanılmıştır ve modelleme SEY ile üç boyutlu olarak gerçekleşmiştir. Frekans alanında yapılan sismik analizler değişik zemin özellikleri ve deprem ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin nükleer santraller için

kullanılan sismik izolasyon sisteminin üzerindeki etkisinin çok az olduğunu göstermiştir.

Luco ve (2014), yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapıların üzerindeki etkisine yönelik analitik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada viskoelastik zemine oturan tek serbestlik dereceli elastik bir üstyapı dikkate alınmıştır. Sismik izolasyon sisteminin davranışı ise nonlineer olarak kabul edilmiştir. Sistemin hareket denklemleri frekans alanında elde edilmiştir ve harmonik yükler etkisinde hareket denklemleri çözülmüştür. Sonuçlar sismik taban izolasyonlu sisteminin tepkisinin yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında daha büyük olduğunu göstermiştir. Castaldo ve Ripani (2016), kayar sarkaç tipi sismik izolatörlerin zemin etkilerini dikkate alarak tasarımı için teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kokusho (2014), yapmış olduğu çalışmada sıvılaşan kum tabakaları üzerine oturan sismik taban izolasyonu sistemlerinin davranışını incelemiştir.

Sayyad ve Bhusare (2016), yapı-zemin etkileşimi etkisi altında yüksek katlı binalarda kullanılan sismik izolasyon sistemlerinin etkinliği konusunda bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırma çok katlı bir betonarme yapı modeli üzerinde yapılmıştır. Analizde değişik zemin özellikleri ve tek tip bir sismik izolasyon sistemi dikkate alınmıştır. SEY'ni kullanılarak gerçekleşen çalışmada, yapı-zemin etkileşimi etkisinde sismik taban izolasyonlu yapının doğal serbest titreşim periyodunun arttığı, ve deplasman, ivme ve taban kesme kuvveti gibi davranış parametrelerinin yapı-zemin etkileşiminden etkilendikleri sonucuna varılmıştır. Özellikle yumuşak zeminlerde bu etkilerin sert zeminlere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Tsai ve ark. (2016), yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada zemin üzerine oturan sismik taban izolasyonlu yapı modeli için kapalı form çözüm elde edilmiştir. Çalışmada, zemin özellikleri ve sismik izolatör sönümünün, yapı sismik davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucu elde edilmiştir. Awward ve Donia

(2016), 2 boyutlu betonarme bir yapı modeli üzerinde yaptıkları araştırmada, sismik taban izolasyonun sert zeminlerde yumuşak zeminlere göre daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda deprem özelliklerinin de yapı sismik davranışında etkili olduğunu göstermektedir. Shekari (2018), yaptığı çalışmada deprem frekans içeriği konusunu dikkate alarak, yapı-zemin etkileşimi altında olan sismik taban izolasyonlu betonarme sıvı tanklarının sismik davranışını araştırmıştır. Değişik frekans içeriğine sahip deprem ivme kayıtları kullanarak yapılan sismik analizler, bu konunun sonuçları oldukça etkileyebileceğini göstermiştir.

Canini ve Forcellini (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu betonarme yapı modeli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma SEY'ne dayanan Opensees yazılımı ile yapılmıştır. Değişik zemin özellikleri ve deprem ivme kayıtları dikkate alınarak, yapısal modelin analizi serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olarak iki durum için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sismik taban izolasyonu olmadan zemin özelliklerinin incelenen ilk dört doğal serbest titreşim periyodu üzerinde etkili olduğunu, ancak izolatörlü yapılarda sadece birinci doğal serbest titreşim periyodunun zemin özelliklerinden etkilendiğini ve diğer üç mod için bu etkinin oldukça küçük olduğunu göstermiştir. Zorlanmış titreşim kısmında, yapı zemin etkileşimi etkisindeki sismik taban izolasyonlu yapıda oluşan deplasman ve ivme değerleri incelenmiştir.

Shafayat ve Kim (2017), tarafından yapılan çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu nükleer santraller üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, nükleer santral için eşdeğer toplanmış kütle modeli kullanılmıştır. Sismik izolatörün ise, bilineer davranışa sahip olduğu varsayılmıştır. Çalışmada ayrıca, yapı-zemin etkileşimi analizi için altyapı analiz yöntemi de kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapı zemin etkileşimi etkisinde, sismik taban izolasyonsuz ve taban izolasyonlu modelin doğal serbest titreşim periyodunun arttığı, ancak bu etkinin taban izolasyonlu modelde daha düşük olduğunu

göstermiştir. Değişik deprem ivme kayıtları etkisinde yapılan zorlanmış titreşim analizi sonuçları ise, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapıda oluşan toplam deplasman, rölatif deplasman ve taban kesme kuvveti üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğunu göstermiştir.

Yukarıdaki literatür çalışmalarında görülmektedir ki, yapı-zemin etkileşimi konusunda yapılan çalışmalar daha çok rijit tabanlı yapılar üzerinde yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisine yönelik yapılan çalışmalar genel olarak köprüler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bina tipi yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda üstyapı özelliklerine gereken değer verilmemektedir ve bu çalışmalar daha çok tek serbestlik dereceli veya basit yapı modellerini içermektedir. Bu tür çalışmalardan, yazarının bilgisine göre, yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu yapıların sismik davranışına etkisi konusunda kısıtlı sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasından elde edilecek sonuçların, özellikle Türk Deprem Yönetmeliğindeki eksiği doldurmak bakımından, önemli binaların analiz ve tasarımlarında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ve taban izolasyonu ile ilgili konuların yönetmeliğe eklenmesi konularında temel teşkil edebileceği öngörülmektedir.

3. MATERYAL VE METOD

Çalışmada yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu çelik yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Dinamik yapı-zemin etkileşimi analizi için direk analiz yöntemi ve altyapı yöntemi olmak üzere iki yöntem mevcuttur. Direk analiz yönteminde yapı, zemin ve temel SEY'ni kullanılarak birlikte modellenmektedirler. Alt yapı analiz yönteminde, iki sistem yani üstyapı ve zemin, iki bağımsız model olarak ele alınır ve bu sistemlerin arasındaki bağlantı, ara yüzeye etki eden etkileşim kuvvetleri tarafından sağlanır.

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi analizi için direk analiz yöntemi kullanılmaktadır. Analizler SEY'ne dayanan SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Sonlu Eleman modelinde, yakın bölge zemin 8 düğümlü Solid elemanı ile tanımlanmaktadır. Bu bölge geçirgen viskoz sınırlar ile uzak bölgeden ayrılmaktadır. Zemin davranışının lineer ve elastik olduğu kabul edilmektedir. Üst yapı ile ilgili olarak Sonlu Eleman modelinde, kiriş ve kolon ve çaprazlar için 2 düğümlü Frame elemanı, döşemeler için 4 düğümlü Shell elemanı ve temel için 8 düğümlü Solid elemanı kullanılmaktadır. Elastomerik sismik izolatör ve temel ile zeminin ara bölgesinde bulunan bağlantı elemanları ise, Link elemanı ile modellenmektedirler. Üstyapı Sonlu Eleman modelinde, çelik çerçeve sistemlerinin P-Δ ve büyük deformasyonlar etkisinde oluşan doğrusal olmayan (nonlineer) davranışa sahip oldukları kabul edilmektedir. Link elemanı ile modellenen sismik izolatörler ve ara bölge bağlantı elemanları ise, doğrusal olamayan davranış göstermektedirler.

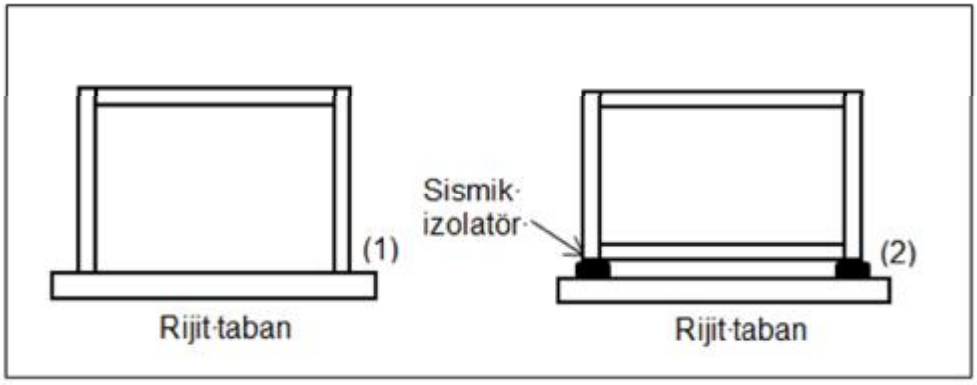
Oluşturulan modele ait dinamik hareket denklemleri, zaman tanım alanında nonlineer analiz yapılarak çözülmekte olup, yapının sismik davranışı elde edilmektedir. Sap2000 programında nonlineer sistemlerin zaman tanım alanında çözümü için sayısal integrasyon yöntemi ve mod birleştirme yöntemine dayanan Hızlı Nonlineer Analiz Yöntemi (HNA) bulunmaktadır. HNA yöntemi, lokal nonlineer davranışa sahip yapıların çözümü için sunulan bir analiz yöntemidir.

Sismik izolatör ve temel-zemin bağlantı elemanlarının nonlineer olarak davranması sistemde lokal bir nonlineer durumun olduğunu göstermektedir. Ancak üstyapıdaki nonlineer davranış genel bir nonlineer davranış durumudur. Bu yüzden sismik analizler sayısal integrasyon yöntemini kullanarak gerçekleşmektedir. Analizlerde sistemin dinamik hareket denklemleri Hilber, Hughes ve Taylor α yöntemi (Wilson, 2002) ile çözülmektedir.

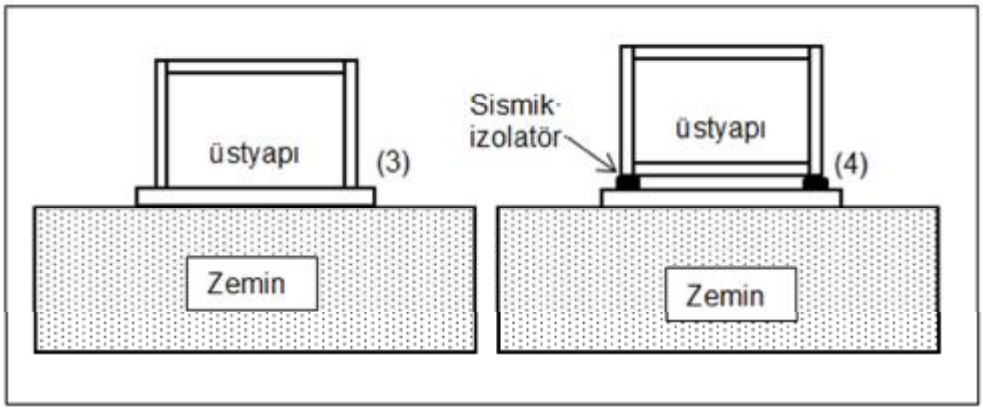
Çalışmada farklı üstyapı, zemin özellikleri ve deprem ivme kayıtları dikkate alınmaktadır. Çelik yapısal modeller ile ilgili olarak kat adeti ve yük taşıma sisteminin sismik davranışındaki etkileri incelenmektedir. Bu yüzden, moment aktaran ve merkezi çaprazlı iki tip yapı için 4, 6 ve 8 katlı olmak üzere toplam 6 adet yapı modeli kullanılmaktadır. Zemin özelliklerinin etkisini değerlendirmek için yumuşak, orta sertlikte ve sert olmak üzere 3 zemin sınıfı analizlerde dikkate alınmaktadır. Deprem özellikleri ile ilgili olarak, analizlerde Kobe ve El Centro depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmaktadır. Sismik analizler, dört aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir:

1) Taban izolasyonsuz yapısal modellerin sismik analizi
2) Taban izolasyonlu yapısal modellerin sismik analizi
3) Taban izolasyonsuz yapısal modellerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik analizi
4) Taban izolasyonlu yapısal modellerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik analizi

Birinci aşamada, taban izolasyonu ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ikinci ve üçüncü aşamada taban izolasyonu ve yapı-zemin etkileşimi ayrı ayrı bağımsız olarak; dördüncü aşamada, yapı-zemin etkileşimi ve taban izolasyonu aynı anda dikkate alınarak sismik analizler yapılmaktadır. Birinci ve ikinci aşama Şekil 3.1'de üçüncü ve dördüncü aşama ise, Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Zemin etkisi dikkate alınmadan sismik analiz aşamaları



Şekil 3.2. Zemin etkisi dikkate alınarak sismik analiz aşamaları

Dört durum için elde edilen serbest titreşim periyodu, rölatif deplasman, taban kesme kuvveti, ivme büyütme katsayısı gibi davranış parametreleri karşılaştırılarak, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu çelik yapıların zemin ve üstyapı özelliklerine göre etkisi incelenmektedir. Sismik izolasyon sisteminin performansı ile ilgili olarak performans katsayısı tanımlanmakta olup, bu katsayı değişik zemin durumları için elde edilerek zemin özelliklerine göre sismik taban izolasyonu sisteminin performansı değerlendirilecektir. Bu şekilde araştırmanın belirlenmiş olan amaçlarına yönelik sonuçlar elde edilecektir.

4. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

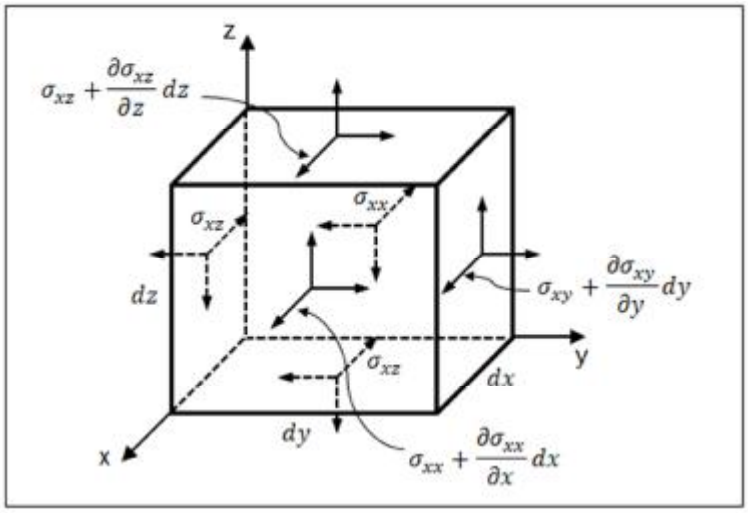
Yapılarının sismik analizi için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması, zemin ortamının sert olmaması durumunda son derece önemlidir. Deprem esnasında, yapı çevresindeki zemin ile etkileşime girerek zeminde deformasyonların oluşumuna neden olur. Bu deformasyonlar, mesnet veya ara yüzey bölgesinin, serbest bölge hareketinden farklı olmasına sebebiyet verir. Bu etkileşimler, yapının tepkisini önemli ölçüde değiştirebilir. Çok sert zeminler için bu değişiklik küçüktür ve ihmal edilebilir. Bu nedenle analizlerde rijit taban varsayımı, sert zeminde inşa edilen yapılar için geçerli bir varsayımdır.

Dalga yayılımı nedeni ile zemin ortamında oluşan titreşim özelliklerine ilişkin bilgi, sayısal tekniklerle gerçekleşen analizlerde zemin impedans fonksiyonlarının veya yarı sonsuz bir zemin ortamının geçirgen sınır özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, bu bölümde önce zeminde dalga yayılımı konusu ve sonra sismik yapı-zemin incelenecektir.

4.1. Zeminde Dalga Yayılımı

Yapı-zemin etkileşimi problemini doğru bir şekilde anlamak için deprem dalgalarının zemin ortamında yayılması ile ilgili bazı bilgilere sahip olmak gerekmektedir. Yapıya etki eden zemin hareketinin dinamik karakteristikleri, zeminde ilerleyen ana kayanın hareketine bağlıdır. Bu nedenle, zemin ortamında dalga yayılımı bilgisi, zemin özelliklerinden dolayı yer hareketi değişikliklerini anlamak için gereklidir.

Zemin ortamına ait bir prizmatik küp elemanı üzerine etki eden gerilmeler Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Söz konusu küp için dış kuvvetler ile iç kuvvetlerin dengede olduğu kolayca gösterilebilir. Küpün, x yönü için dinamik denge denklemi, Denklem 4.1'de verildiği gibi yazılabilir (Datta, 2010). Diğer iki yönde de denge durumunu dikkate alarak y ve z yönleri için dinamik denge denklemleri, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'te verildiği gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.1. Prizmatik küp elemanı üzerindeki gerilmeler

$$\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho_s \ddot{u} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \tag{4.1}$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \rho_s \ddot{v} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \tag{4.2}$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \rho_s \ddot{w} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \tag{4.3}$$

Denklemlerde σ_{xx}, σ_{yy} ve σ_{zz} normal gerilmeleri, σ_{xy}, σ_{xz} ve σ_{zy} kayma gerilmelerini; ρ_s zeminin kütlesel yoğunluğunu; u, v ve w deplasmanları ve t zamanı göstermektedir. Zeminde oluşan ivme ise, $\ddot{u}$, $\ddot{v}$ ve $\ddot{w}$ ile ifade edilmektedir. Şekil değiştirme-deplasman ilişkilerini kullanarak bu üç eşitlik Denklem 4.4, Denklem 4.5 ve Denklem 4.6 şeklinde yazılabilir.

$$\rho_s \ddot{u} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \tag{4.4}$$

$$\rho_s \ddot{v} = (\lambda + \mu)\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \tag{4.5}$$

$$\rho_s \ddot{w} = (\lambda + \mu)\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \tag{4.6}$$

Bu denklemlerde $\ddot{u}$, $\ddot{v}$ ve $\ddot{w}$ sırasıyla x, y ve z yönündeki ivmeyi göstermektedirler. λ ve μ Lame sabitleri, ∇^2 ise, Laplasyen operatörüdür. $\bar{\varepsilon}$, x, y ve z yönündeki normal şekil değiştirmelerin toplamıdır ve aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{\varepsilon} \cong \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

Lame sabitleri zeminin elastisite modülü E_s, kayma modulu G_s ve Poisson oranı ν_s'e göre Denklem 4.7'de verildiği gibi hesaplanmaktadırlar.

$$E_s = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}; \qquad G_s = \mu; \qquad \nu_s = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \tag{4.7}$$

Dinamik denge denklemleri farklı sınır koşulları altında çözülerek, deprem dalgası yayılımı nedeni ile zeminin herhangi bir noktasında x, y ve z yönlerinde oluşan deplasmanlar elde edilmektedir.

Sonsuz bir zemin ortamı için Denklem 4.4, Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'dan iki tip dalga denklemi elde edilmektedir. Birinci tip, denklemlerin x, y ve z'ye göre türevi alınarak ve bileştirilerek Denklem 4.8'de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$\rho_s\left(\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial t^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_{yy}}{\partial t^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_{zz}}{\partial t^2}\right)=(\lambda+\mu)\left(\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial z^2}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_{yy}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_{zz}}{\partial z^2}\right) \quad (4.8)$$

Denklem 4.8, Denklem 4.9 veya Denklem 4.10 gibi de yazılabilmektedir. Bu tip dalga P dalgası olarak adlandırılır.

$$\rho_s\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial t^2}=(\lambda+\mu)\nabla^2\bar{\varepsilon}+\mu\nabla^2\bar{\varepsilon}=(\lambda+2\mu)\nabla^2\bar{\varepsilon} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial t^2}=V_{\mathrm{P}}^2\nabla^2\bar{\varepsilon} \qquad V_{\mathrm{P}}=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho_s}} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da V_p, P dalgasının hızını $\bar{\varepsilon}$ ise, kayma ve dönme etkilerini içermeyen hacimsel şekil değiştirmeyi göstermektedir. Bu yüzden, bu dalga denklemi sadece dalga yayılımı yönünde hareketi olan bir dalgayı ifade etmektedir. P dalgasının hızı V_p, Lame sabitlerini Denklem 4.10'da yerlerine yerleştirilerek, Denklem 4.11'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$V_{\mathrm{P}}=\sqrt{\frac{2G_s(1-\nu_s)}{\rho_s(1-2\nu_s)}} \quad (4.11)$$

Denklem 4.10 tek boyutlu dalga yayılımı için Denklem 4.12 veya Denklem 4.13 şeklinde yazılabilmektedir. Tek boyutlu dalga yayılımı durumda Poisson oranı ν_s , dikkate alınmadığı için P dalgasının hızı, $V_p=\sqrt{E_s/\rho_s}$ olur.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial t^2} = \sqrt{\frac{2G_s(1-\gamma)}{\rho(1-2\gamma)}} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{4.13}$$

İkinci tip dalga denklemi, Denklem 4.6'nın z ve y'ye göre türevi alınarak ve $\bar{\varepsilon}$'yi ortadan kaldırarak Denklem 4.14'te verildiği gibi yazılmaktadır. Denklemde θ_x, x ekseni etrafında dönmeyi ifade etmektedir ve Denklem 4.15'den elde edilmektedir.

$$\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \quad \text{veya} \quad \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \qquad V_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}} \tag{4.14}$$

$$\theta_x = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{4.15}$$

Bu dalga, S dalgası veya kayma dalgası olarak tanımlanmaktadır. Kayma dalgasının yayılma hızı V_s ile gösterilmektedir. Bu dalga yayılımındaki oluşan hareket, dalga yayılımının yönüne dik bir düzlemde gerçekleşmektedir. S dalgaları genellikle S-H ve S-V olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadırlar. Hareket sadece dalga yayılım yönüne yatay olarak gerçekleşirse, buna bir S-H dalgası denir. Benzer şekilde bir S-V dalgası sadece dikey yönde harekete sahiptir.

Zemin üst sınırında serbest bir yüzeyin varlığına bağlı olarak Rayleigh dalgası ve Love dalgası olmak üzere iki tür ek dalga oluşmaktadır. Her iki dalga da yüzey dalgaları olarak adlandırılır ve P ve S dalgalarına göre daha düşük hızla yayılmaktadırlar.

Rayleigh dalgası diğer yüzey dalgalarına göre yayılma hızı en düşük olandır ve dalganın etkisinde zeminde oluşan hareket dikey yönde gerçekleşmektedir. Rayleigh dalgasının yayılımı Denklem 4.16 ve Denklem 4.17 ile ifade edilmektedir.

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \tag{4.16}$$

$$w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{4.17}$$

Yukarıda verilen iki denklem Rayleigh dalga denklemlerinin P ve S dalga denklemlerine benzerliğini ve Rayleigh dalgasının bu iki dalganın birleşimi olduğunu göstermektedir. Bu denklemler Denklem 4.18 ve Denklem 4.19'u sağlamaktadırlar. Denklem 4.18 ve Denklem 4.19 çözülerek u ve w elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = V_{\mathrm{p}}^2 \nabla^2 \varphi \tag{4.18}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = V_s^2 \nabla^2 \psi \tag{4.19}$$

Love dalgaları, esas itibariyle aşağıdaki tabakalardan daha düşük kayma dalgası hızına sahip bir yüzey tabakası malzemesi içinde yansımalar etkisinde oluşan S-H dalgalarıdır. Love dalgaları yayılımı, S dalgası gibidir ve bu yüzden S dalgası denklemleri Love dalgası için kullanılabilir. Zeminde Rayleigh ve Love dalgalarının yanı sıra, başka yüzey dalgaları da oluşmaktadır. Ancak bu dalgalar

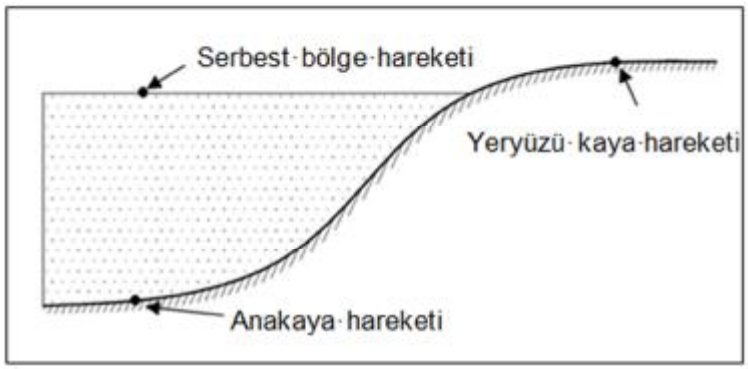
yapıları etkileyebilecek yer hareketleri oluşturma açısından çok daha az öneme sahipler.

4.2. Zemin Tepki Analizi

Yerel zemin koşullarının serbest zemin hareketinin niteliğine olan etkisi bilinmektedir. Bu etki, ana kaya hareketinden kaynaklanan dalgaların yayılımı ve bu dalgaların serbest zemin yüzeyinde oluşturduğu tepkinin analizi vasıtasıyla incelenir. Söz konusu analiz zemin tepki analizi olarak tanımlanmaktadır. Problemin boyutu ve alan koşullarına ve geometrisine bağlı olarak, zemin tepki analizi tek, iki veya üç boyutlu olarak yapılabilmektedir.

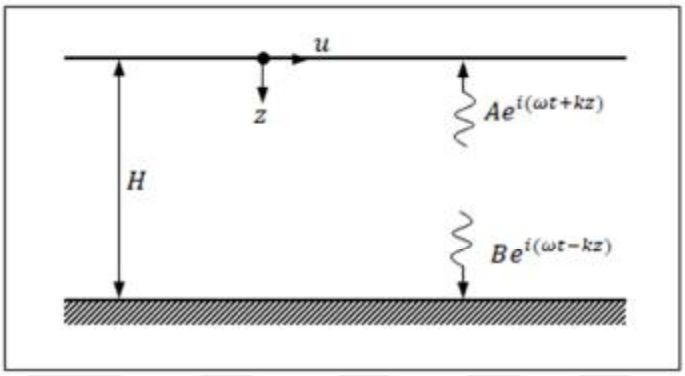
4.2.1. Tek Boyutlu Dalga Yayılımı ve Zemin Tepki Analizi

Tek boyutlu zemin tepki analizi, birçok durumda serbest zemin hareketinin makul derecede tahminini sağladığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, bir boyutlu analiz hesaplama açısından basittir. Bu nedenlerden dolayı, genelde zemin tepki analizi için kullanılır (Datta, 2010). Zemin tepki analizinde kullanılan terimler Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Zemin tepki analizinde kullanılan terimler

Şekil 4.3'te lineer elastik zemin ortamı için bir boyutlu dalga yayılımı analizi şematik olarak gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, bir boyutlu dalga yayılımı analizi, zemin tepkisinin ağırlıklı olarak ana kayadan dikey olarak yayılım gösteren S-H dalgalarına bağlı olduğu varsayımına dayanmaktadır.



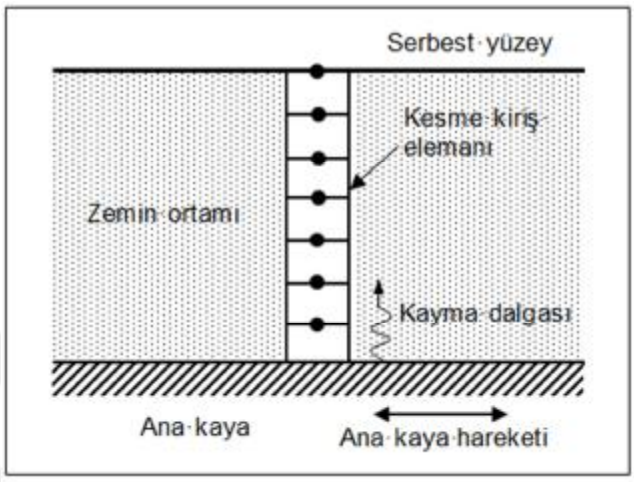
Şekil 4.3. Lineer elastik zeminde tek boyutlu dalga yayılımı

Zemin davranışı lineer olarak kabul edilirse problemin çözümü oldukça kolay hale gelir ve Denklem 4.14'de verilen dalga denklemi çözülerek serbest zemin hareketi elde edilir. Zeminin davranışının nonlineer olduğu veya güçlü yer hareketi söz konusu olması durumunda, zemin tepkisini elde etmek için nonlineer veya eşdeğer bir lineer analizin yapılması gerekmektedir. Bu durumda, çözüm için dalga denklemi kullanılamaz ve genellikle SEY'ni kullanılarak daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirilir.

4.2.2. Zaman Tanım Alanında Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizi

Zaman tanım alanında tek boyutlu zemin tepki analizi için Şekil 4.4'te verildiği gibi zemin ortamı kesme kiriş elemanlarına ayrılır ve zemin kütlesi düğüm noktalarında tanımlanır. Zemin için makul bir sönüm oranı dikkate alınarak Denklem 4.20'de verilen hareket denklemi sayısal olarak çözülür ve üst noktadaki tepki zaman tanım alanında elde edilir.

$$\boldsymbol{M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MI\ddot{u}_g} \quad (4.20)$$



Şekil 4.4. Tek boyutlu zemin tepki analizi için kesme kiriş elemanı

Denklem 4.20'de $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{C}$ ve $\boldsymbol{K}$ sırayla eşdeğer kesme kirişinin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedirler. Ana kaya seviyesindeki zemin ivmesi $\ddot{u}_g$ ile, zeminin yatay hareketi ise, $\boldsymbol{u}$ ile gösterilmektedir. Zemin tepki analizinde kuvvetli yer hareketi durumu için zemin nonlineer davranışı dikkate alınmalıdır. Nonlineer tepki analizi için hareket denklemi Denklem 4.21'de verildiği gibi modifye edilir.

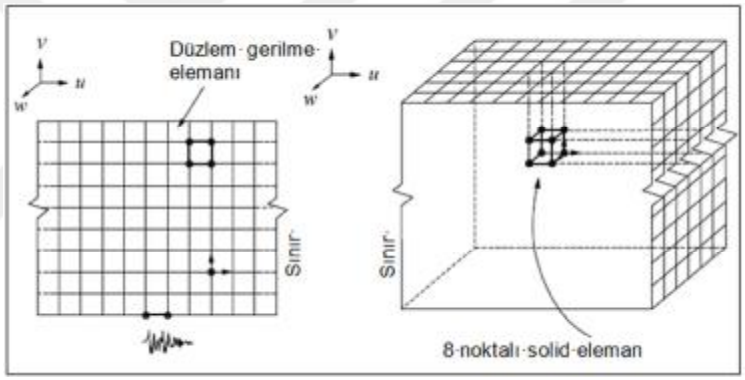
$$\boldsymbol{M\ddot{u} + C\dot{u} + R(u) = -MI\ddot{u}_g} \quad (4.21)$$

Denklemde $\boldsymbol{R(u)}$ zeminin tekrarlı yük etkisi altında nonlineer yük-deplasman ilişkisini göstermektedir. Denklem 4.21 sayısal yöntemler ile çözülerek zeminin tepkisi elde edilir.

4.2.3. Zaman Tanım Alanında İki ve Üç Boyutlu Zemin Tepki Analizi

Tek boyutlu zemin tepki analizi yöntemi, SEY'ni kullanılarak iki veya üç boyutlu sistemler için uygulanabilir. Tek boyutlu kesme kiriş elemanlarını düşünmek yerine, analiz için iki veya üç boyutlu elemanlar düşünülürse, iki veya üç yön için zemin tepkileri elde edilir.

Şekil 4.5'te verildiği gibi Sonlu Eleman modelinde iki boyutlu problemlerin çözümü için düzlem gerinim elemanları, üç boyutlu problemlerde ise, 8 düğümlü Solid elemanlar kullanabilir (Datta, 2010). SEY'ne dayanan Ansys, Abaqus ve Sap2000 gibi yazılımlar iki ve üç boyutlu zemin tepki analizi için kullanılabilmektedirler.

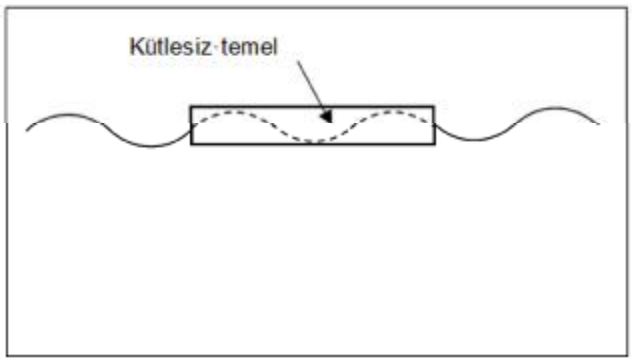


Şekil 4.5. SEY kullanarak zemin tepki analizi için kullanılan iki ve üç boyutlu yaklaşım (Datta, 2010)

4.3. Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi

Dinamik yapı-zemin etkileşiminin etkisi, yapının rijitlik ve kütle özelliklerine, zeminin rijitliğine ve zemin ve yapının sönümleme özelliğine bağlıdır. Dinamik yapı-zemin etkileşimi kinematik etkileşim ve atalet etkileşimi olmak üzere iki tür etkileşimden oluşmaktadır. Kinematik etkileşim, yapının rijitliğinin, atalet etkileşimi ise, yapının kütlesinin sonucudur. Kinematik etkileşim Şekil 4.6 yardımıyla açıklanmaktadır. Şekil 4.6'da, kütlesiz temel, eğilme rijitliği nedeni ile yer hareketinin düşey yöndeki hareketini sınırlamaktadır. Sonuç olarak,

temel, serbest zemin hareketinden farklı hareket eder ve temelin yakın çevresi ve altındaki zemin hareketinin niteliği değişir. Temel ile yer hareketi arasındaki bu etkileşime kinematik etkileşim denir. Kinematik etkileşim aynı zamanda, dikey olarak yayılan S dalgalarından dolayı temelde dönüş hareketi oluşturabilir.

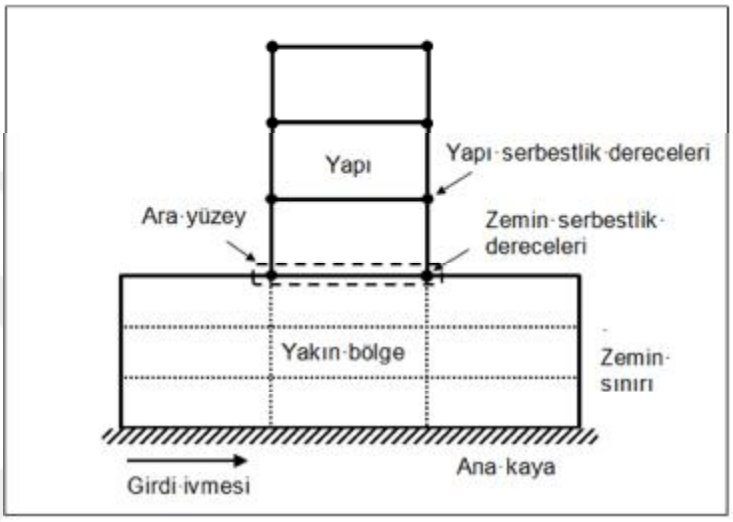


Şekil 4.6. Kinematik yapı-zemin etkileşimi

Atalet etkileşimi, titreşim sırasında yapı kütlesinin hareketi nedeniyle yapıda oluşan atalet kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Ataletten kaynaklanan dinamik yükler temele aktarılır. Bu durumda zemin yumuşak ise, temelde dinamik deplasmanlar oluşur. Ancak çok sert zeminlerde bu etki oldukça azdır.

Temel-zemin ara yüzeyindeki dinamik deplasman, serbest bölge zemin hareketinden, kinematik etkileşiminden ve atalet etkileşiminden dolayı oluşan deplasmanların toplamıdır. Temelin etrafındaki zeminin atalet etkisi ile üretilen titreşime maruz kaldıkça, yer hareketinden dolayı yapıda oluşan enerjinin bir kısmı kaybolur. Bu enerji, radyasyon dalgaları şeklinde zeminin içinde yayılır ve aşağı tabakaları indikçe sona erer. Bu enerji kaybı zeminin radyasyon sönümü olarak tanımlanmaktadır ve atalet etkileşimi konusunda önem taşımaktadır. Radyasyon sönümü ve zeminin temel hareketine karşı gösterdiği rijitlik, zeminin impedans fonksiyonlarını bularak teorik olarak elde edilebilir. Bütün bu etkileşim etkileri, yapının davranışı ve temelin altındaki zeminin hareketlerini değiştirir ve dinamik yapı-zemin etkileşimi olarak bilinir.

Dinamik yapı-zemin etkileşimi problemleri farklı şekillerde ele alınabilir. En doğru yaklaşım Şekil 4.7'de verildiği gibi yapı ve etrafındaki zemini berber dikkate alarak ve SEY'ni kullanarak modellemektir. Söz konusu model için dinamik hareket denklemi, Denklem 4.22'de verildiği gibi yazılmaktadır.



Şekil 4.7. Yapı-zemin etkileşiminin çözümü için şematik sonlu eleman modeli

$$\boldsymbol{M\ddot{V}} + \boldsymbol{C\dot{V}} + \boldsymbol{KV} = -\boldsymbol{MI}\ddot{u}_g \tag{4.22}$$

Denklem 4.19'da, $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{C}$ ve $\boldsymbol{K}$ yapı-zemin sisteminin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\ddot{u}_g$ zemin ivmesini $\boldsymbol{I}$ ise, etki vektörünü göstermektedirler. Belirli bir zemin hareketi için hareket denklemi zaman alanında veya Fourier dönüşümü kullanarak frekans alanında çözülerek rölatif deplasman vektörü $\boldsymbol{V}$ elde edilir. Mutlak deplasman vektörü, zemin deplasmanını her bir serbestlik derecesinde oluşan rölatif deplasmana ekleyerek elde edilir. Bu yöntem yapı-zemin etkileşimi çözümünde direk yöntem olarak tanımlanmaktadır. Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin çözümünde kullanılan diğer bir yöntem altyapı yöntemidir. Bu yöntemler detaylı olarak aşağıda incelenmektedirler.

4.3.1. Direk Yöntem

Direk yöntemde yapı, zemin ve temel, SEY kullanılarak birlikte modellenmektedirler. Yapıya etki eden atalet kuvvetleri, yapı, temel ve zemin-temel ara bölgesinde titreşim oluşturduğu kabul edilmektedir. Bu durumda hareket denklemi Denklem 4.23'te verildiği gibi elde edilir. Denklemde $\boldsymbol{M}$ yapı-temel-zemin sisteminin kütle matrisi, $\boldsymbol{C}$ yapı ve zeminin sönüm matrisi, $\boldsymbol{K}$ tüm sistemin rijitlik matrisi, $\boldsymbol{M}_s$ üstyapı kütle matrisi, $\boldsymbol{I}$ etki katsayısı vektörü, $\ddot{u}_g$ serbest zemin ivmesi ve $\boldsymbol{u}$ temele göre oluşan rölatif deplasman vektörüdür.

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{M}_s\boldsymbol{I}\ddot{u}_g \tag{4.23}$$

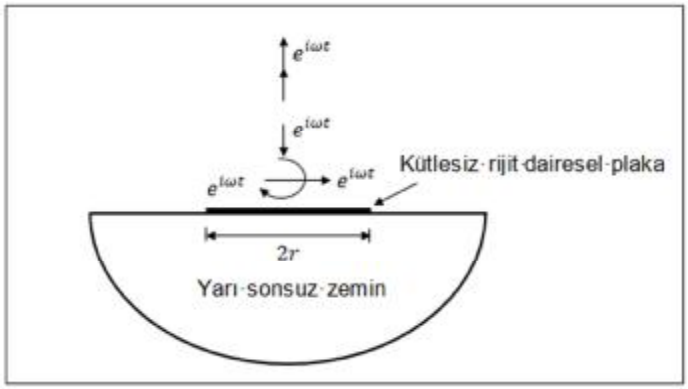
Sistemin tamamını içeren rijitlik matrisi standart prosedürü kullanılarak üretilebilir. Sönüm matrisi, Rayleigh sönüm modelini dikkate alarak, yapı ve zemin için elde edilen sönüm matrislerini birleştirilerek oluşturulmaktadır. Direk yöntemde, problem belirli bir serbest zemin hareketi için zaman tanım alanında veya frekans alanında çözülebilir. Dinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerini direk yöntemle çözmek için SEY'ni kullanan standart yazılımımlar kullanılabilir.

4.3.2. Altyapı Yöntemi

Alt yapı analiz yönteminde iki sistem, yani üstyapı ve zemin, iki bağımsız model olarak ele alınır. İki model arasındaki bağlantı, ara yüzeye etki eden etkileşim kuvvetleri tarafından sağlanır. Dinamik denge denklemleri nihai olarak ara yüzey serbestlik dereceleri cinsinden yazılır ve zaman tanım alanında ya da frekans alanında çözülür. Zemin, impedans fonksiyonları bilinen elastik bir yarı sonsuz ortam olarak ele alınır. Bu impedans fonksiyonları alt yapı analiz yönteminin anahtar parametreleridir.

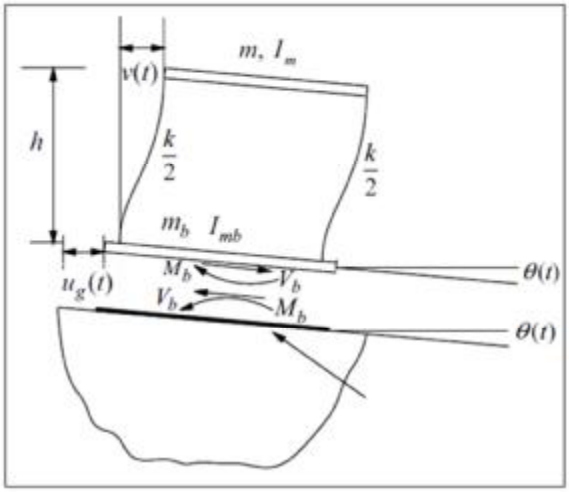
Elastik yarı sonsuz zemin üzerine oturan rijit ve kütlesiz bir dairesel temelin impedans fonksiyonları, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi kompleks harmonik

birim yük tanımlanarak elde edilir. Plakanın serbestlik derecelerinde oluşan deplasmanlar kompleks sayılar olarak elde edilir ve kompleks esneklik matrisi oluşturulur. Elde edilen matrisin tersi impedans matrisi olarak tanımlanmaktadır. İmpedans matrisinde, girişimli terimler yalnızca dönme ve deplasman arasında bulunur. Her bir serbestlik derecesinin reel ve sanal kısımlar sırasıyla o serbestlik derecesinin rijitlik ve sönümünü göstermektedir. İmpedans fonksiyonları alt yapı analiz yönteminin anahtar parametreleridir.



Şekil 4.8. Elastik yarı sonsuz uzay için zemin impedans fonksiyonları

Altyapı analiz yöntemini incelmek için Şekil 4.9'da verildiği gibi tek serbestlik dereceli olarak modellenen bir üstyapı dikkate alınmaktadır. Model kütlesiz ve rijit bir taban plakası üzerinde oturmaktadır ve yarı sonsuz zeminin elastik bir davranışa sahip olduğu kabul edilmektedir. Modelin tabanında, taban kesme kuvveti etkisinde deplasman ve moment etkisinde dönme oluşmaktadır.



Şekil 4.9. Tek serbestlik dereceli sistemin altyapı modeli için şematik gösterimi

İzotropik ve homojen yarı sonsuz zemin üzerine oturan r çapında rijit ve kütlesiz taban plakası için dinamik rijitlik veya impedans fonksiyonları Denklem 4.24'te verilen rijitlik matrisi ile ifade edilmektedir. Denklemde G_{vv}, $G_{v\theta}$, $G_{\theta v}$ ve $G_{\theta\theta}$ frekansa bağlı karmaşık fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar Denklem 4.25' te verildiği gibi reel ve sanal kısımlardan oluşmaktadırlar.

$$\boldsymbol{G}_d(\omega) = \begin{bmatrix} G_{vv} & G_{v\theta} \\ G_{\theta v} & G_{\theta\theta} \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

$$G(ia) = G^{\mathrm{R}}(a) + iG^{\mathrm{I}}(a) \tag{4.25}$$

Denklem 4.25'te R ve I, reel ve sanal kısımları tanımlamaktadırlar. Reel kısım zemin rijitliğini sanal kısım ise, sönümü ifade etmektedir. Boyutsuz frekans a ile gösterilmektedir ve Denklem 4.26'dan elde edilmektedir. Denklemde V_s kayma dalgasının hızıdır.

$$a = \frac{r\omega}{V_s} \tag{4.26}$$

Yapı zemin etkileşimi etkisinde tabanda oluşan deplasman $v(t)$ ve dönme $\theta(t)$ ile ifade edilmektedir. Tabanda oluşan toplam deplasman v^t, Denklem 4.27'den elde edilmektedir. Denklemde $u_g(t)$ serbest zemin deplasmanını göstermektedir.

$$v^t = v(t) + u_g(t) \tag{4.27}$$

Şekil 4.8'i dikkate alarak tek serbestlik dereceli sistemin üst noktasında bulunan kütle için hareket denklemi, Denklem 4.28'de verildiği gibi elde edilmektedir. Denklemde u kütlenin tabana göre rölatif deplasmanını, h kolon yüksekliğni, k toplam yatay rijitliği, m üç noktasında toplanmış kütleyi, ξ sönüm oranını, ω_n döğal serbest titreşim frekansını ve $\ddot{v}^t$ toplam ivmeyi göstermektedir.

$$m\ddot{u} + 2m\omega_n\xi\dot{u} + ku + mh\ddot{\theta} + m\ddot{v}^t = 0 \tag{4.28}$$

Üstyapı ve yarı sonsuz zemin arasındaki oluşan etkileşim kuvvetleri, V_b ve M_b, üstyapı denge durumunu dikkate alarak elde edilir. Üstyapı denge denklemleri Denklem 4.29 ve Denklem 4.30'da verilmektedir. Denklemlerde m_b ve I_{mb} temel plakasının kütle ve kütlesel atalet momentini göstermektedir.

$$m\ddot{u} + mh\ddot{\theta} + (m + m_b)\ddot{v}^t - V_b = 0 \tag{4.29}$$

$$mh\ddot{u} + (mh^2 + I_m + I_{mb})\ddot{\theta} + mh\ddot{v}^t - M_b = 0 \tag{4.30}$$

Etkileşim kuvvetleri V_b ve M_b, elastik yarı sonsuz zemine oturan rijit plakanın hareketini dikkate alarak elde edilir. Bu kuvvetlerin frekansa bağlı karmaşık empedans fonksiyonlar yardımı ile elde edilebilir. Denklem 4.28,

Denklem 4.29 ve Denklem 4.30 Fourier dönüşümü kullanarak frekans alanında sırasıyla Denklem 4.31, Denklem 4.32 ve Denklem 4.33 şeklinde yazılmaktadırlar.

$$g(\omega)u(\omega) - mh\omega^2\theta(\omega) - m\omega^2 v^t(\omega) = 0 \quad (4.31)$$

$$-m\omega^2 u(\omega) - mh\omega^2\theta(\omega) - (m + m_b)\omega^2 v^t(\omega) - V_b(\omega) = 0 \quad (4.32)$$

$$-mh\omega^2 u(\omega) - \bar{I}_m\omega^2\theta(\omega) - mh\omega^2 v^t(\omega) - M_b(\omega) = 0 \quad (4.33)$$

Denklemlerde $\bar{I}_m = I_m + I_{mb} + mh^2$ ve $g(\omega)$ tek serbestlik dereceli sistemin frekans alanında kompleks tepki fonksiyonunun tersidir. $V_b(\omega)$ ve $M_b(\omega)$ Denklem 4.24' te verilen impedans matrisi cinsinden yazılırsa yukarıda verilen üç denklem, Denklem 4.34'te verildiği gibi yeniden düzenlenebilir.

$$\boldsymbol{K}_g(\omega)\boldsymbol{d}(\omega) = \boldsymbol{M}\ddot{u}_g(\omega) \quad (4.34)$$

Denklem 4.34'te $\boldsymbol{K}_g(\omega)$ yapı-zemin sisteminin frekansa bağlı karmaşık rijitlik matrisi, $\boldsymbol{d}(\omega)$ deplasman vektörünün karmaşık frekans bileşenleri, $\ddot{u}_g(\omega)$ zemin ivmesinin kompleks frekans bileşenleridir. $\boldsymbol{M}$ ise, Denklem 4.35'ten elde edilmektedir.

$$\boldsymbol{M} = -[m(m + m_b)mh]^T \quad (4.35)$$

Denklemi matris formunda elde etmek için Denklem 4.36'da verilen matris denklemi kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_b \\ M_b \end{bmatrix} = \boldsymbol{G}_d(\omega)\begin{Bmatrix} u(\omega) \\ \theta(\omega) \end{Bmatrix} \quad (4.36)$$

$\boldsymbol{K}_g(\omega)$' nın bileşenleri aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$K_{g\,11} = g(\omega) \qquad K_{g\,12} = K_{g\,21} = -\omega^2 m$$

$$K_{g\,13} = K_{g\,31} = -\omega^2 mh \qquad K_{g\,22} = -\omega^2(m + m_b) + G_{uu}(\omega)$$

$$K_{g\,33} = -\omega^2 \bar{I}_m + G_{\theta\theta}(\omega) \qquad K_{g\,23} = K_{g\,32} = -\omega^2 mh + G_{u\theta}(\omega)$$

Her frekans için Denklem 4.34 çözülerek deplasman vektörünün kompleks frekans bileşenleri $\boldsymbol{d}(\omega)$ elde edilir. Deplasman vektörünün $\boldsymbol{d}(\omega)$ üzerinde Ters Fourier dönüşümü yapılarak zaman alanında tepki elde edilir.

5. SİSMİK TABAN İZOLASYONU

5.1. Binaların Sismik Kontrolü

Sismik kontrol sistemleri, deprem etkisinin büyük bir kısmının yapıya aktarılmasını önlemek veya yönlendirilmek için kullanılmaktadırlar. Yapıların sismik kontrolü için değişik sistemler geliştirilmiştir. Genel olarak bu sistemler aşağıda verildiği gibi dört gruba ayrılmaktadırlar.

- Pasif sismik kontrol sistemleri
- Aktif sismik kontrol sistemleri
- Yarı aktif sismik kontrol sistemleri
- Hibrid sismik kontrol sistemleri

Pasif kontrolde, yapıya ek elemanlar ilave edilerek kütle, sönüm ve rijitlik özellikleri modifiye edilir. Pasif kontrol sistemlerinin aktif edilmesi için dış enerji kaynağına gerek yoktur ve yapıda oluşan herhangi bir hareket bu sistemleri aktif hale getirir ve bu şekilde yapısal kontrol sağlanır. Aktif kontrol sistemlerinde, bir dış enerji kaynağı analog veya dijital sinyaller yardımı ile sistemi aktif hale getirir. Bu sinyaller yapı hareketlerini ölçen kontrol algoritmasını kullanan bir bilgisayar tarafından oluşturulur. Bu iki yöntemi birleştirilerek yarı aktif ve hibrid sismik kontrol sistemleri oluşmaktadır (Datta, 2010).

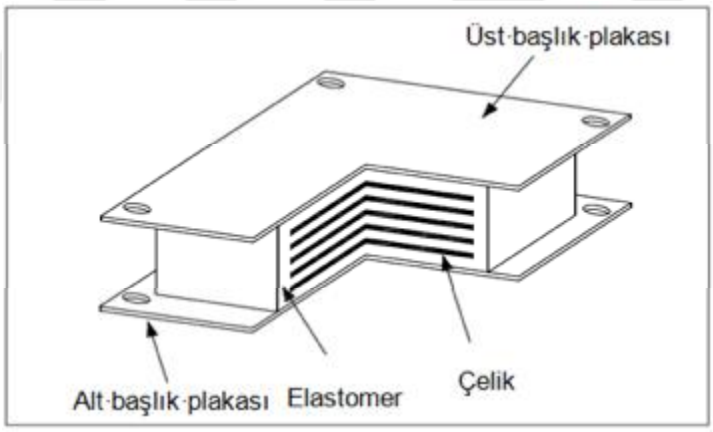
5.2. Sismik Taban İzolasyonu Sistemleri

Sismik taban izolasyonu, depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılmakta olan popüler bir sismik kontrol yöntemdir. Bu yöntemde temel ve binanın arasına esnek bir yapıya sahip pasif kontrol elemanları yerleştirilmektedir. Sismik taban izolasyonu yönteminde temel prensip, binanın doğal serbest titreşim periyodu ve sönüm oranının artmasını ve rölatif deplasmanların ve kat ötelemelerinin azalmasını sağlamaktır. Binaların sismik izolasyonu için değişik

sistemler geliştirilmiştir. Genel olarak bu sistemler elastomer esaslı ve sürtünme esaslı olarak iki gruba ayrılır. En kullanışlı olan izolasyon sistemleri aşağıda tanımlanmaktadır.

5.2.1. Elastomerik Sismik İzolatörler

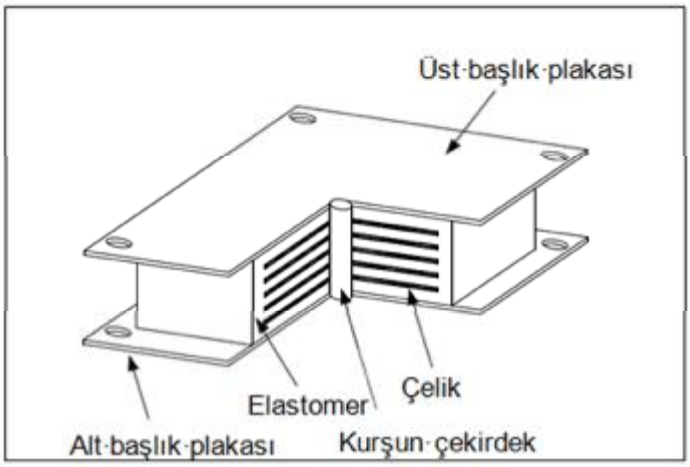
Elastomerik sismik izolatörler Şekil 5.1'de verildiği gibi, çelik ve elastomer tabakalardan oluşan katmanlı sismik izolasyon sistemleridir. Bu sistemler düşey yüklere karşı yüksek düşey rijitliğe sahipler ancak yatay yöndeki rijitlikleri daha düşüktür. Yüksek düşey rijitlik çelik tabakalar ile; yatay esneklik ise, elastomer tabakalar ile sağlanmaktadır. Genelde elastomerik izolatörlerin sönüm oranı düşüktür. Bu yüzden bu sistemlere ek sönüm elemanları entegre edilerek binalarda kullanılmaktadırlar.



Şekil 5.1. Elastomerik sismik izolatör (Datta, 2010)

5.2.2. Kurşun Çekirdekli Elastomerik Sismik İzolatörler

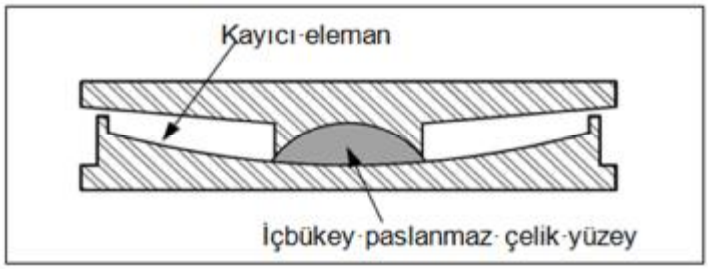
Kurşun çekirdekli elastomerik izolatörler, elastomerik izolatörler gibi elastomer ve çelik katmanlardan oluşur. Ancak bu sistemlere kurşundan yapılmış olan bir çekirdek ilave edilir (Şekil 5.2). Kurşun çekirdek sistemin enerji sönüm kapasitesinin artmasına sebep olur (Datta, 2010).



Şekil 5.2. Kurşun çekirdekli elastomerik sismik izolatör (Datta, 2010)

5.2.3. Kayar Sarkaç Tipi Sismik İzolatörler

Kayar sarkaç tipi izolatörler, kayma eylemi ve geri getirme kuvvetine dayanarak çalışan sürtünme esaslı sistemlerdir (Şekil 5.3).



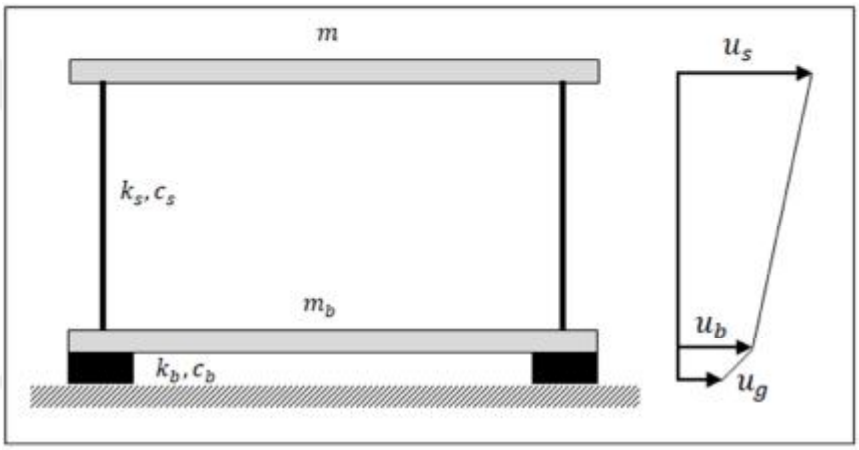
Şekil 5.3. Kayar sarkaç tipi sismik izolatör

Sistemde paslanmaz çelikten yapılmış olan küresel yüzey ve onun üzerinde hareket edebilen bir kayma elemanı bulunmaktadır. Kayma elemanının küresel yüzey ile temasta olan yüzeyi düşük sürtünmeli kompozit malzeme ile sıvanmaktadır. Kayma elemanının yüzey üzerinde hareket edebilmesi geri getirme kuvvetinin oluşumunu sağlamaktadır. Ayrıca eleman ve yüzey arasındaki sürtünme izolatördeki sönümü oluşturmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).

5.3. Sismik Taban İzolasyonunun Teorik Temeli

5.3.1. Lineer Teori

Sismik izolasyonlu yapıların lineer teorisi, Şekil 5.4'te verilen iki kütleli modele dayanarak elde edilmektedir (Naeim ve ark, 1999: Kelly, 1996). Modelde m, üstyapı kütlesini ve m_b izolasyon sisteminin üzerinde bulunan kütleyi ifade etmektedir. Üstyapı rijitlik ve sönümü, k_s ve c_s ile, izolasyon sisteminin rijitliği ve sönümü ise, k_b ve c_c ile gösterilmektedir.



Şekil 5.4. İki serbestlik dereceli sismik izolasyonlu sistemi şematik görünüşü

İki kütlenin mutlak deplasmanı u_s ve u_b,ve zeminin deplasman u_g olduğu durumda, sistemdeki rölatif deplasmanlar Denklem 5.1 ve Denklem 5.2'den elde edilmektedir.

$$v_b = u_b - u_g \tag{5.1}$$

$$v_s = u_s - u_b \tag{5.2}$$

İki serbestlik dereceli sistemin özelliklerini dikkate alarak hareket denklemleri Denklem 5.3 ve Denklem 5.4' te verildiği gibi yazılmaktadır.

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (5.3)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_b = -m\ddot{u}_g \quad (5.4)$$

Hareket denklemlerinin matris şekli ise, Denklem 5.5 ve Denklem 5.6'da verilmektedir. Sistemin toplam kütlesi *M*, her iki serbestlik derecesinde bulunan kütleyi toplayarak elde edilmektedir. Denklem 5.6'da **M** kütle matrisi, **C** sönüm matrisi ve **K** rijitlik matrisidir. İvme, hız ve deplasman vektörleri ise, sırayla $\ddot{\mathbf{v}}$, $\dot{\mathbf{v}}$ ve **v** ile gösterilmektedirler.

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (5.5)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (5.6)$$

5.3.2. Çok Serbestlik Dereceli Sismik İzolasyonlu binaların Hareket Denklemleri

Basit lineer model üzerinde gerçekleşmiş olan analiz, çok katlı binalar için de uygulanabilir. Konvansiyonel yapılarda, her serbestlik derecesinde oluşan rölatif deplasman Denklem 5.7'de verilen hareket denkleminden elde edilmektedir. Rölatif deplasman vektörü **u**, serbestlik derecesinin zemine göre deplasmanını göstermektedir. Denklem 5.7'de **M** kütle matrisi, **C** sönüm matrisi ve **K** rijitlik matrisidir. **r** vektörü ise, her bir serbestlik derecesinin yer hareketi ile ilişkisini sağlamaktadır.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (5.7)$$

Yapı temelinin bir izolasyon sistemi üzerine oturduğunda, sistemi idare eden hareket denklemi değişmektedir. İzolasyonlu durumda Denklem 5.7'de verilen hareket denklemi, Denklem 5.8 şeklinde yazılmaktadır. Yapıda bulunan her bir serbestlik derecelerinde oluşan rölatif deplasmanlar, Denklem 5.8'den elde edilmektedir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\mathbf{r}(\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) \tag{5.8}$$

Denklem 5.8' de **v** taban plakasına göre rölatif deplasmanın vektörünü; $\ddot{v}_b$ ise, taban plakasının zemine göre rölatif ivmesini göstermektedir. Birleşik bina ve taban plakası için elde edilen hareket denklemi Denklem 5.9'da verilmektedir. Denklem 5.9, Denklem 5.10 şeklinde yazılabilir. Denklemde $m + m_b$ izolasyon sisteminin taşıdığı kütleyi ifade etmektedir.

$$\mathbf{r^T M}\left(\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{r}\ddot{v}_b + \mathbf{r}\ddot{u}_g\right) + m_b\left(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g\right) + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = 0 \tag{5.9}$$

$$\mathbf{r^T M}\ddot{\mathbf{v}} + (m + m_b)\ddot{v}_b + c_b + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \tag{5.10}$$

Denklem 5.10 matris ifadesi Denklem 5.11 gibidir. Denklem 5.11'de $\mathbf{M}^*$ kütle matrisidir ve Denklem 5.12'de verilmektedir.

$$\mathbf{M}^*\ddot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{C}^*\dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{K}^*\mathbf{v}^* = -\mathbf{M}^*\mathbf{r}^*\ddot{u}_g \tag{5.11}$$

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} m + m_b & \mathbf{r}^T\mathbf{M} \\ \mathbf{M}\mathbf{r} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

Sönüm matrisi, $\mathbf{C}^*$ Denklem 5.13'den, rijitlik matrisi, $\mathbf{K}^*$ Denklem 5.14'ten elde edilmektedir.

$$\mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

$$\mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

İlişki vektörü, $\mathbf{r}^*$ ve deplasman vektörüdür, $\mathbf{v}^*$ ise, Denklem 5.15 ve Denklem 5.16'da verildiği gibidir.

$$\mathbf{r}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

$$\mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} u_b \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

Elde edilen hareket denklemi modal analiz veya direk integrasyon yöntemlerini kullanarak çözülebilmektedir.

5.4. Elastomerik Sismik İzolatörlerin Mekanik Özellikleri

Elastomerik izolatörlerin mekanik özelliklerini değerlendirmeğe yönelik çalışmalar yıllardır araştırmacılar tarafından yapılmaktadır. Bu tip izolatörlerin nonlineer tekniklere dayanan analizi oldukça zor olduğu için elastik teoriye dayanan basit modeller geliştirilmiştir ve bu modeller deneysel testler veya SEY'den yaralanarak doğrulanmıştır (Naeim ve Kelly, 1999). Yatay rijitlik, K_H, elastomerik izolatörlerin en önemli mekanik özelliği olarak tanımlanmaktadır. Elastomerik izolatörlerin yatay rijitliği Denklem 6.17'den elde edilmektedir. Denklemde G_e elastomerin kayma modülü, A kesit alanı, t_r ise, elastomerin toplam kalınlığıdır.

$$K_H = \frac{G_e A}{t_r} \tag{5.17}$$

İzolatörde oluşan maksimum kayma açısı, τ Denklem 5.18'den elde edilmektedir. Denklemde D izolatörün maksimum deplasmanını göstermektedir.

$$\tau = \frac{D}{t_r} \tag{5.18}$$

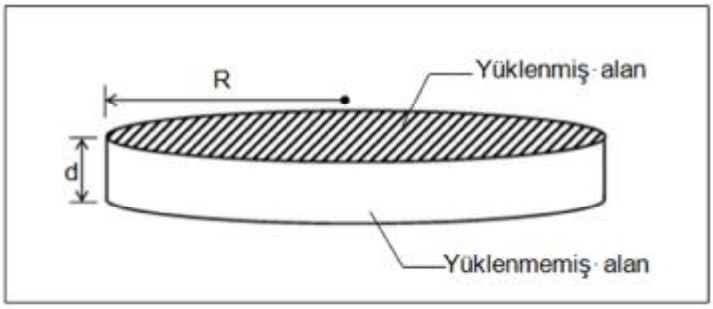
Elastomerik izolatörlerin tasarımında, düşey rijitlik, K_V ve eğilme riğitliği, EI gibi önemli mekanik özellikler de dikkate alınmaktadır. İzolatörün düşey rijitliği Denklem 5.19'dan elde edilmektedir. Denklemde E_c basınç modülüdür.

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \tag{5.19}$$

Elastomer ve çelik tabakalardan oluşan katmanlı elastomerik izolatörlerde, düşey rijitliğin hesabında basınç modülünün dikkate alınması gerekmektedir. Dairesel kesitli izolatörlerde tek bir elastomer tabakası için basınç modülü, E_c Denklem 5.20'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_c = 6G_e S^2 \tag{5.20}$$

Basınç modülünün hesabında dikkate alınana Şekil Faktörü, S tabakanın yüklenmiş alanının yüklenmemiş alana göre oranını göstermektedir (Şekil 5.5). Dairesel bir elastomer tabaka için Şekil Faktörü Denklem 5.21'den elde edilmektedir. Denklem 5.21'de R, elastomer tabakanın yarıçapı ve t, kalınlığıdır.



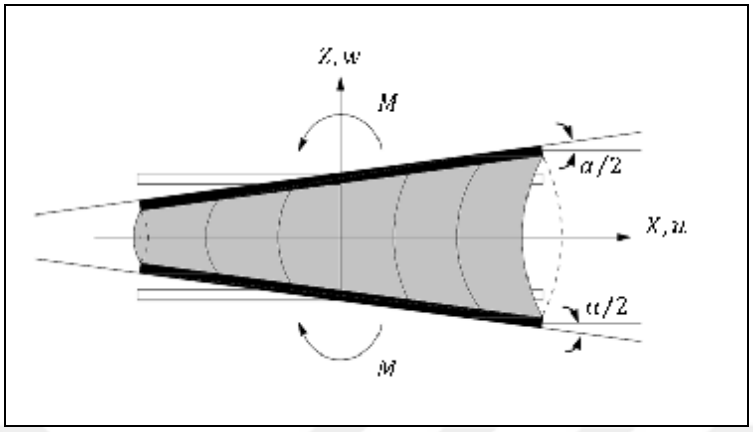
Şekil 5.5. Dairesel elastomer tabaka için yüklenmiş ve yüklenmemiş alan

$$S = \frac{R}{2d} \tag{5.21}$$

Elastomer tabakanın diğer bir mekanik özelliği olan eğilme rijitliği, EI kiriş teorisine göre hesaplanmaktadır. Hesaplarda Şekil 5.6'da gösterildiği gibi iki rijit çelik tabakanın arasında bulunan elastomer tabaka dikkate alınarak, davranışı basit eğilme durumunda değerlendirilmektedir. Elastomer tabakanın eğrilik yarıçapı, θ alt ve üst çelik plakaların rölatif açısına göre hesaplanmaktadır ve Denklem 5.22'den elde edilmektedir. Kiriş teorisine göre moment ile eğrilik yarıçapının bağlantısı Denklem 5.23'te verildiği gibidir.

$$\frac{1}{\theta} = \frac{\alpha}{r} \tag{5.22}$$

$$M = \frac{EI}{\theta} \tag{5.23}$$



Şekil 5.6. Elastomer tabakanın çelik tabakalar arasındaki basit eğilme durumu (Naiem ve Kelly, 1999)

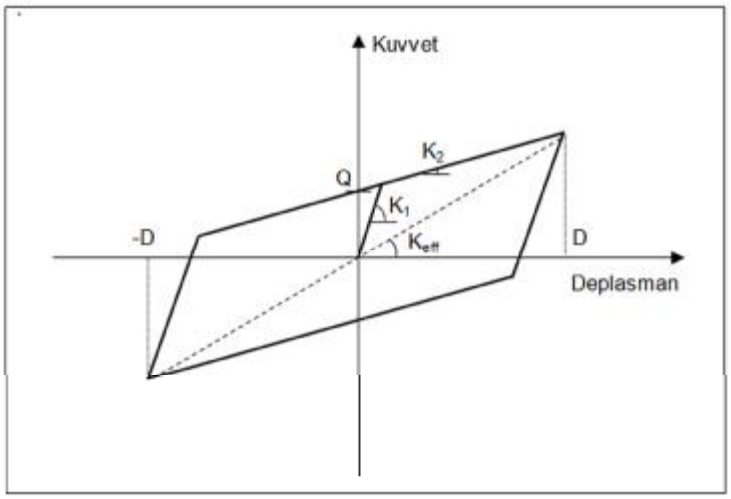
Denklem 5.22 ve Denklem 5.23'ü dikkate alarak elastomer tabakada oluşan moment, Denklem 5.24'de verildiği gibi elde edilmektedir. Dairesel bir elastomer tabaka için Denklem 5.24 Denklem 5.25'de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$M = (EI)_{eff}\frac{\alpha}{d} \tag{5.24}$$

$$M = \frac{3\alpha G_e}{2d^3}\frac{\pi R^6}{12} \tag{5.25}$$

5.5. Sismik İzolatörlerin Bilineer Modeli

Sismik izolatör sistemleri Şekil 5.7'de verildiği gibi, K_1, K_2 ve Q parametreleri esas alınarak, bilineer olarak modellenebilmektedirler. Şekil 5.7'de elastik rijitlik, K_1 akma sonrası rijitlik, K_2 ve karakteristik dayanım, Q ile gösterilmektedir. Elastomerik izolatörler için karakteristik dayanım elastomerin akma dayanımına eşittir. Sismik izolatörün efektif rijitliği, K_{eff}, histerik eğrinin sekant eğimi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.7. Sismik izolatör için kullanılan bilineer davranış modeli için kuvvet-deplasman eğrisi

Efektif rijitlik Denklem 5.26'dan elde edilmektedir. Denklemde D maksimum deplasmanı D_y ise, akma deplasmanını ifade etmektedir. Akma deplasmanı Denklem 5.27'den elde edilmektedir.

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \qquad D > D_y \tag{5.26}$$

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \tag{5.27}$$

Histerik eğrinin alanı tüketilmiş enerjiye eşittir ve Denklem 5.28'e göre hesaplanmaktadır. Efektif sönüm (ξ_{eff}) ise, Denklem 5.29'dan elde edilmektedir.

$$W_D = 4Q(D - D_y) \tag{5.28}$$

$$\xi_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \tag{5.29}$$

Efektif rijitlik izolasyonlu sistemin doğal serbest titreşim periyodu, T_b' ye göre Denklem 5.30'dan elde edilmektedir.

$$K_{eff} = \frac{W}{g}\left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2 \tag{5.30}$$

Bu çalışmada Elastomerik sismik izolatörler kullanarak yapısal modellerin sismik davranışı incelenmektedir. Sap2000 programında elastomerik sismik izolatör için lineer ve nonlineer davranış tanımlanabilmektedir. Nonlineer izolatör davranışını tanımlamak için bu bölümde tanımlanan bilineer model kullanılmaktadır.

6. SAYISAL MODELLEME

Bilgisayar ve yazılım teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, mühendislik problemlerinin analizinde kullanılan sayısal yöntemlere günümüzde oldukça önem verilmektedir. Söz konusu problemlerin çözümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), Sınır Elemanı Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi vb. sayısal yöntemler kullanılmaktadır. SEY özellikle yapı mühendisliği alanında tercih edilen bir yöntemdir. Bu yönteme dayanarak SAP2000 (CSI, 2017), ANSYS (Kohnke, 1999), ABAQUS vb. gibi değişik ticari yazılımlar geliştirilmiş olup ve araştırma ve uygulamada kullanılmaktadırlar.

Sayısal yöntemler ile yapılmakta olan bu çalışmada SAP2000 V.18 hazır paket yazılımı kullanılmıştır. SAP2000 özellikle inşaat mühendisliği problemlerinin çözümü için CSI tarafından geliştirilmiş olan ve SEY'ne dayanan bir yazılımdır. Programda Sonlu Eleman modellemesi Frame, Shell, Plane, Solid ve Link gibi değişik elamanların yardımı ile gerçekleştirilmektedir. SAP2000 programı statik ve dinamik olarak değişik analiz yöntemleri mevcuttur. Bu bölümde Sonlu Eleman modeline kullanılan elemanların özellikleri ve analiz yöntemleri incelenmektedir.

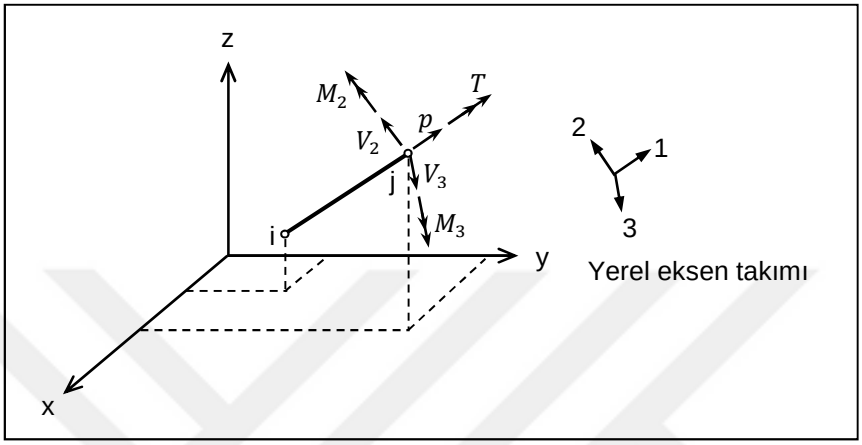
6.1. Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Bileşenler

Sonlu Eleman modelinde, yapısal modeller, zemin, sismik izolatör, zemin-temel ara yüzeyi ve zemin viskoz geçirgen sınırları için kullanılan elemanlar aşağıda incelenmektedir.

6.1.1. Üç Boyutlu Frame Elemanı

Üç boyutlu Frame elemanı iki adet düğüm noktasından oluşmaktadır ve her düğüm noktasında altı adet serbestlik derecesine bulunmaktadır. SAP2000 programında Frame elemanı kiriş, kolon ve çapraz gibi yapısal elemanların

modellenmesinde kullanılmaktadır. Frame elemanının yerel eksen takımı ve bu eksenler doğrultusundaki serbestlik dereceleri Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Yerel eksen takımında Frame elemanının uç kuvvetleri

Frame elemanını rijitlik matrisi 1, 2 ve 3 yerel eksen takımından oluşan koordinat sistemine göre elde edilmektedir (Wilson, 2002). Elemanın denge denklemi, Denklem 6.1'de verilmektedir. Denklemde $\mathbf{f_j}$ elemanın j ucundaki kuvvet vektörünü, $\mathbf{k_j}$ elemanın j ucuna göre elde edilen rijitlik matrisini ve $\mathbf{d_j}$ elemanın j ucundaki deformasyon vektörünü göstermektedir. Denklem 6.1'de P eksenel kuvveti, V_2 ve V_3 kesme kuvvetlerini, T burulma momentini, M_2 ve M_3 ise eğilme momentlerini ifade etmektedirler.

$$\begin{bmatrix} P \\ V_2 \\ V_3 \\ T \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & 0 & k_{26} \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & k_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{53} & 0 & k_{55} & 0 \\ 0 & k_{62} & 0 & 0 & 0 & k_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ v_2 \\ v_3 \\ \phi_T \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad veya \quad \mathbf{f_j} = \mathbf{k_j d_j} \qquad (6.1)$$

Elemanın i ucundaki kuvvet vektörü bağımsız değildir ve Denklem 6.2'de verildiği gibi j ucundaki etki eden kuvvetler cinsinden yazılabilmektedir. Denklem 6.2'de L elemanın boyunu ve $\mathbf{b_{ij}^T}$ ise dönüşüm matrisini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} P \\ V_2 \\ V_3 \\ T \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L & 0 & -1 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V_2 \\ V_3 \\ T \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix}_J \quad veya \ \mathbf{f_i} = \mathbf{b_{ij}^T f_j} \qquad (6.2)$$

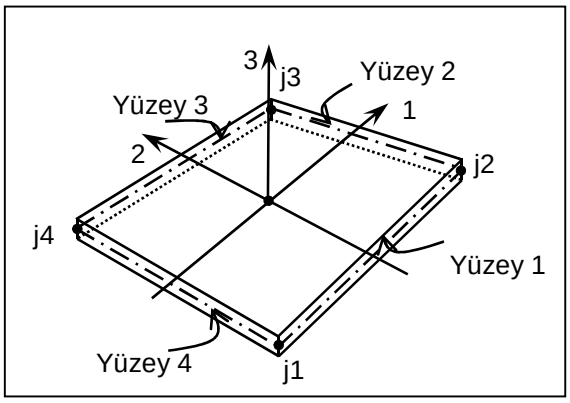
Elemanın her iki ucundaki oluşan 12 kuvvet, j ucundaki kuvvetler cinsinden Denklem 6.3'te verilen matris denklemi ile ifade edilebilir. Denklemde i birim matrisidir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f_i} \\ \mathbf{f_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b_{ij}^T} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{f_j} \qquad \text{Veya} \quad \mathbf{f_{ij}} = \mathbf{b^T f_j} \qquad (6.3)$$

6.1.2. Üç Boyutlu Shell Elemanı

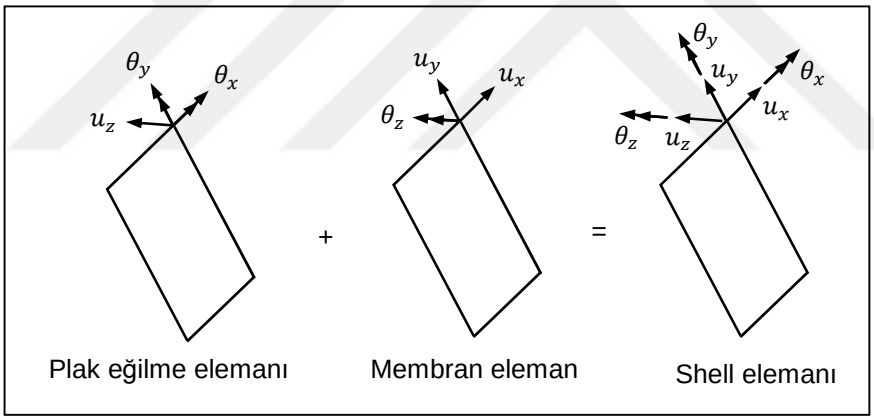
Shell elemanı, düzlemsel ve üç boyutlu yapılarda membran, plaka ve kabuk davranışını modellemek için kullanılan bir elemandır. Elemanda Şekil 6.2'de verildiği gibi dört adet düğüm noktası bulunmaktadır ve her düğüm noktası için altı adet serbestlik derecesi vardır.

Shell elemanı 1, 2 ve 3 eksenlerinden oluşan yerel koordinat sistemine sahiptir. Yerel koordinat sistemi malzeme ve yüklerin tanımlanması ve analiz sonuçlarının elde etmesinde kolaylık sağlamaktadır (Wilson, 2002). Yerel eksen takımı sistemine göre oluşturulan rijitlik matrisi 24×24 boyutludur.



Şekil 6.2. Üç boyutlu Shell elemanı

Shell elemanı Şekil 6.3'te gösterildiği gibi plak eğilme elemanı ve membran elemanının birleşiminden oluşmaktadır.

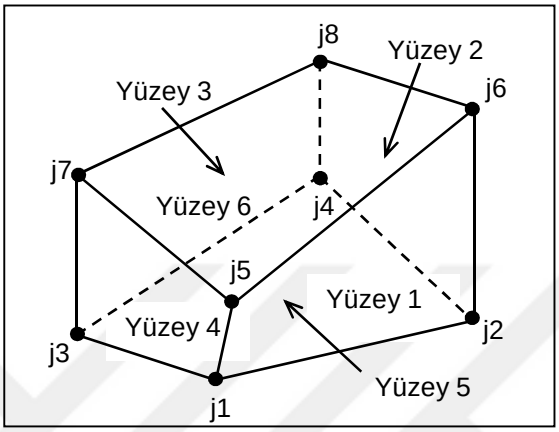


Şekil 6.3. Shell elemanının oluşumu

6.1.3. Solid Elemanı

Solid elemanı üç boyutlu yapısal elemanların modellenmesi için kullanılmaktadır. Solid elemanını Şekil 6.4'te gösterildiği gibi toplam altı adet yüzey ve sekiz adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Eleman dokuz adet bağımsız eğilme modu içeren bir izoparametrik formülasyona dayanmaktadır. Bağımsız eğilme modları elemanın eğilme davranışını önemli ölçüde geliştirir. Solid

elemanı, her düğüm noktasında üç adet deplasman serbestlik derecesine sahiptir. Dönme serbestlik dereceleri bu eleman için aktif değildir (CSI, 2016).



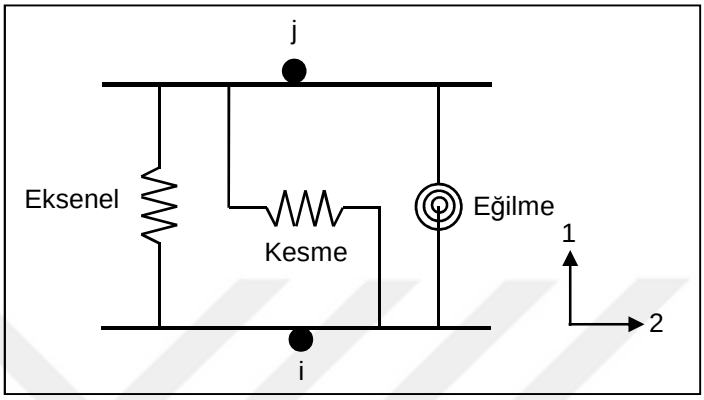
Şekil 6.4. Solid elemanının düğüm noktaları ve yüzeyleri

Dinamik analizde atalet kuvvetlerini hesaplamak için toplanmış kütle modeli kullanılmaktadır ve kütlenin düğüm noktalarında toplandığı varsayılmaktadır. Solid eleman ile oluşturulan Sonlu Eleman modelinde, yüzeyde bulunan dörtgen iç açılarının 45 ila 135 derece aralığında olması ve yüzey kenarlarının 1 ila 4 aralığında orantılı olması daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi mümkündür. Bu eleman için altı gerilme ve şekil değiştirme bileşeni mevcuttur (CSI, 2016).

6.1.4. Link Elemanı

Link elemanı, iki düğüm noktasını birbirine bağlamak için kullanılmaktadır. Üç boyutlu Link elemanı altı adet yaydan, iki boyutlu eleman ise Şekil 6.5'te verildiği gibi üç adet yaydan oluşmaktadır. Yaylar iki nokta arasındaki eksenel, kesme ve eğilme kuvvetlerini aktarmaktadırlar. Link elemanında, elamana tanımlanan özellikler ve analiz yöntemine göre doğrusal, doğrusal olmayan ve

frekansa bağlı olmak üzere üç farklı davranış tanımlanabilmektedir. Çalışmada kullanılmakta olan Link elemanlarının özellikleri aşağıda incelenmektedir.



Şekil 6.5. İki boyutlu Link elemanının serbestlik dereceleri

6.1.4.1. Doğrusal Link Özelliği

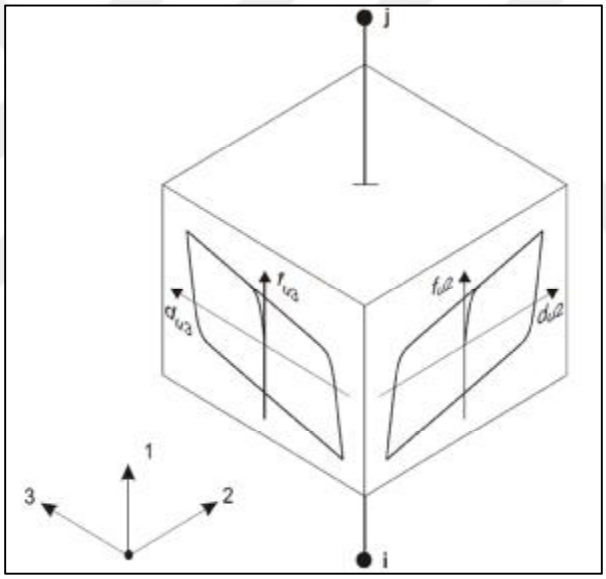
Doğrusal Link elemanında tüm yaylar doğrusal davranış göstermektedirler ve her serbestlik derecesi için bağımsız olarak rijitlik ve sönüm tanımlanabilmektedir. Bu durumda doğrusal Link elemanının yük-deformasyon ilişkisi Denklem 6.4'te verilen matris denklemi ile ifade edilebilir. Denklem 6.4'te $f_{u1},\dots,f_{u6}$, yay kuvvetlerini, $k_{u1},\dots,k_{u6}$, yay katsayılarını, $d_{u1},\dots,d_{u6}$ ise deplasmanları göstermektedir.

$$\begin{Bmatrix} f_{u1} \\ f_{u2} \\ f_{u3} \\ f_{u4} \\ f_{u5} \\ f_{u6} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{u3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{u4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{u5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{u6} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{u1} \\ d_{u2} \\ d_{u3} \\ d_{u4} \\ d_{u5} \\ d_{u6} \end{Bmatrix} \tag{6.4}$$

Yay katsayıları sönüm katsayılarıyla, deplasmanlar ise hız ile yer değiştirmesi durumunda aynı şekilde doğrusal sönüm davranışı için benzer ilişki elde edilebilir.

6.1.4.2. Elastomerik İzolatör Özelliği

Çift çizgili histerik davranış özelliğine sahip olan elemanda, iki yöndeki kayma deformasyonları için girişimli plastik özellikleri (Şekil 6.6) ve eksenel ve dönmeden oluşan kalan dört deformasyon için doğrusal efektif rijitlik özellikleri tanımlanmaktadır.



Şekil 6.6. Elastomer izolatörün çift çizgili yük- deformasyon eğrisi

Kayma yönündeki serbestlik dereceleri için doğrusal veya doğrusal olmayan özelliklerin tanımlanması bağımsız olarak mümkündür. Her iki kayma serbestlik derecesinin davranışı nonlineer olduğu durumunda girişimli yük-deformasyon ilişkisi Denklem 6.5 ve 6.6'dan elde edilmektedir. Denklemlerde, k_2 ve k_3 elastik yay katsayısı, y_2 ve y_3 akma dayanımı r_2 ve r_3 ise akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe göre oranıdır.

$$f_{u2} = r_2 k_2 d_{u2} + (1 - r_2) y_2 z_2 \tag{6.5}$$

$$f_{u3} = r_3 k_3 d_{u3} + (1 - r_3) y_3 z_3 \tag{6.6}$$

Histerik değişken olarak tanımlanan z_2 ve z_3 Denklem 6.7'den elde edilmektedir. Histerik değişkenlerin hesabında başlangıç miktarı sıfırdır.

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - a_2 {z_2}^2 & -a_3 z_2 z_3 \\ -a_2 z_2 z_3 & 1 - a_3 {z_3}^2 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{y_2} \dot{d}_{u2} \\ \frac{k_3}{y_3} \dot{d}_{u3} \end{Bmatrix} \tag{6.7}$$

Denklem 6.7'de verilen a_2 ve a_3 katsayıları aşağıdaki denklemlerde verildiği gibi hesaplanmaktadırlar.

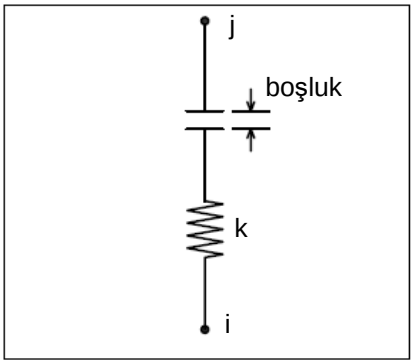
$$a_2 = \begin{cases} 1 & eğer\ \dot{d}_{u2} z_2 > 0 \\ 0 & aksi\ halde \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} 1 & eğer\ \dot{d}_{u3} z_3 > 0 \\ 0 & aksi\ halde \end{cases}$$

6.1.4.3. Gap Özelliği

Gap özelliğine sahip Link elemanı sadece basınçta çalışır. Her deformasyon serbestlik derecesi için bağımsız olarak doğrusal veya doğrusal olmayan özelliklerin tanımlanması mümkündür. Gap elemanında tüm serbestlik derecelerinde oluşan deformasyonlar birbirinden bağımsızdır. Doğrusal durum için sadece yay rijitlik katsayısı, doğrusal olmayan durum için Şekil 6.7'de verildiği gibi yay rijitlik katsayısı ve boşluk tanımlanmaktadır. Bu durumda boşluk kapanana kadar eleman yük taşımamaktadır. Doğrusal olmayan durumu için yük-

deplasman ilişkisi Denklem 6.8'de verilmektedir. Denklemde P_g elemanın taşıdığı yükü, $\mathbf{k}$ yay rijitlik katsayısını d_g ise deplasmanı göstermektedir.



Şekil 6.7. Eksenel deformasyon için doğrusal olmayan Gap

$$P_g = \begin{cases} \mathbf{k}(d_g + \text{derz}) & \text{eğer } d_g + \text{boşluk} < 0 \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (6.8)$$

Gap özelliğine sahip Link elemanı zemin temel veya zemin-kazık ara yüzeyinin modellenmesinde kullanılabilir.

6.2. Zaman Tanım Alanında Doğrusal (Lineer) Dinamik Analiz

6.2.1. Dinamik Hareket Denklemleri

Çok serbestlik dereceli ve toplanmış kütle modeline sahip bir sistemin zamana bağlı hareket denklemi, Denklem 6.9'da verilmektedir. Denklemde t zamanı, $\mathbf{F}(t)_I$ düğüm noktalarında oluşan atalet kuvvetleri vektörünü, $\mathbf{F}(t)_D$ viskoz sönüm kuvvetleri vektörünü, $\mathbf{F}(t)_S$ iç kuvvetle vektörünü ve $\mathbf{F}(t)$ dış yükler vektörünü göstermektedir. Denklem doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için geçerlidir (Wilson, 2002).

$$\mathbf{F}(t)_I + \mathbf{F}(t)_D + \mathbf{F}(t)_S = \mathbf{F}(t) \quad (6.9)$$

Doğrusal yapısal sistemler için hareket denklemi, Denklem 6.10'da verilen ikinci mertebe doğrusal diferansiyel denklemi şeklinde ifade edilir. Denklemde **M** kütle matrisi, **C** viskoz sönüm matrisi ve **K** statik rijitlik matrisidir. Zaman bağlı olan $\ddot{\mathbf{u}}(t)_a$, $\dot{\mathbf{u}}(t)_a$ ve $\mathbf{u}(t)_a$ vektörleri sırasıyla düğüm noktalarında oluşan mutlak ivme, hız ve deplasmanları göstermektedirler.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{K}\mathbf{u}(t)_a = \mathbf{F}(t) \tag{6.10}$$

Deprem yüklemesi için dış yük vektörü, $\mathbf{F}(t)$ sıfıra eşittir. Bu durumda deprem hareketi $u(t)_{ig}$ ile gösterilen serbest zemin deplasmanının üç bileşeninden oluşmaktadır. Dolayısıyla Denklem 6.10' da verilen deplasman, hız ve ivme, serbest zemin deplasmanının üç bileşenine göre elde edilebilir (Wilson, 2002). Zemin hareketi bileşenlerine göre elde edilen deplasman, hız ve ivme mutlak değerleri Denklem 6.11'de verilmektedir.

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}(t)_a &= \mathbf{u}(t) + \mathbf{I}_x u(t)_{xg} + \mathbf{I}_y u(t)_{yg} + \mathbf{I}_z u(t)_{zg} \\
\dot{\mathbf{u}}(t)_a &= \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{I}_x \dot{u}(t)_{xg} + \mathbf{I}_y \dot{u}(t)_{yg} + \mathbf{I}_z \dot{u}(t)_{zg} \\
\ddot{\mathbf{u}}(t)_a &= \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{I}_x \ddot{u}(t)_{xg} + \mathbf{I}_y \ddot{u}(t)_{yg} + \mathbf{I}_z \ddot{u}(t)_{zg}
\end{aligned} \tag{6.11}$$

Denklemde $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ ve $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ serbest zemine göre deplasman, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. I matrisi ise serbestlik derecesi yönündeki değeri 1 ve diğer yönlerde değeri sıfır olan bir matristir. Denklem 6.11'de verilen deplasman, hız ve ivme, Denklem 6.10'da yerine koyulursa deprem etkisindeki bir yapı sisteminin hareket denklemi elde edilir. Elde edilen hareket denklemi Denklem 6.12'de verilmektedir. Denklemde $\mathbf{M_i} = \mathbf{MI_i}$ olarak tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}_x\ddot{u}(t)_{xg} - \mathbf{M}_y\ddot{u}(t)_{yg} - \mathbf{M}_z\ddot{u}(t)_{zg} \quad (6.12)$$

Denklem 6.12'nin çözümü için mod birleştirme ve sayısal integrasyon yöntemi olmak üzere iki farklı klasik yöntem kullanılmaktadır. Her yöntem, yapı türüne ve yükleme özelliklerine bağlı olarak avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

6.2.2. Dinamik Hareket Denklemlerinin Çözümü

6.2.2.1. Mod Birleştirme Yöntemi

Doğrusal yapısal sistemlerin sismik analizi için en yaygın ve etkili yaklaşım mod birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde çok sayıda denge denklemi bir takım girişimsiz ikinci mertebe diferansiyel denkleme indirilmektedir. Bu denklemleri sayısal olarak çözülerek sistemin dinamik tepkisi elde edilir. Denklem 6.10'da verilen dinamik denge denklemi, Denklem 6.13'te verildiği gibi bir takım ikinci mertebe diferansiyel denklem cinsinden yazılabilir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \boldsymbol{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) = \sum_{j=1}^{J} \mathbf{f}_j\mathbf{g}(t)_j \quad (6.13)$$

Denklem 6.13' ün çözümü için kullanılan temel matematiksel yöntem, değişkenlerin ayrılmasıdır. Bu yaklaşımda, çözümün Denklem 6.14 biçimde ifade edilebileceği varsaymaktadır.

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Phi}\mathbf{Y}(t) \quad (6.14)$$

Denklemde **Φ,** mod vektörlerini içeren modal matrisi ve $\mathbf{Y}(t)$ zaman fonksiyonlarının içeren vektörü tanımlamaktadır. Denklem 6.14'ü dikkate alarak hız ve ivme için Denklem 6.15 ve Denklem 6.16 elde edilmektedir.

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\Phi}\dot{\mathbf{Y}}(t) \tag{6.15}$$

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\Phi}\ddot{\mathbf{Y}}(t) \tag{6.16}$$

Çözüm için kütle ve rijitlik matrislerinin Denklem 6.17 ve Denklem 6.18'de verilen ortogonallik koşullarını sağlaması gerekmektedir. Sönüm matrisinin ise ortogonallik koşullarını sağladığı varsayılmaktadır.

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I} \tag{6.17}$$

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Omega}^{\mathbf{2}} \tag{6.18}$$

Denklemde $\mathbf{I}$ diyagonal birim matrisi ve $\boldsymbol{\Omega}^{\mathbf{2}}$ ise $\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{i}}^{\mathbf{2}}$ terimlerini içeren diyagonal matrisi göstermektedir. $\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{i}}$ ise radyan/saniye birimli frekansları göstermektedir.

Denklem 6.14, Denklem 6.15 ve Denklem 6.16, Denklem 6.13'te yerine yazılıp soldan $\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}$ matrisi ile çarpılırsa, Denklem 6.19 elde edilir. Denklem 6.21, N adet girişimsiz doğrusal denklemi içermektedir. Denklemde, $\mathbf{p}_j$, j inci yükleme için modal katılım oranı olarak tanımlamaktadır ve Denklem 6.20'den elde edilmektedir. $\mathbf{d}$ ise Denklem 6.21'den elde edilmektedir.

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{d}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \boldsymbol{\Omega}^{\mathbf{2}}\mathbf{Y}(t) = \sum_{j=1}^{J} \mathbf{p}_j \mathbf{g}(t)_j \tag{6.19}$$

$$\mathbf{p}_j = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{f}_j \tag{6.20}$$

$$\mathbf{d} = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\boldsymbol{\Phi} \tag{6.21}$$

Gerçek yapılarda N×N boyutlu **d** matrisi diyagonal değildir. Bu yüzden denklemlerin girişimsiz olması için klasik sönüm kabulü yapılması gerekmektedir. Söz konusu kabule dayanarak diyagonal üzerindeki terimler Denklem 6.22'den elde edilmektedir. Diyagonal dışı terimler ise sıfıra eşit olmaktadırlar. Denkleme ζ_n, n. moduna ait sönüm oranını göstermektedir (Wilson, 2002).

$$d_{nn} = 2\zeta_n\omega_n \tag{6.22}$$

Doğrusal bir yapı sistemi için tipik girişimsiz modal eşitlik, Denklem 6.23'te verilmektedir.

$$\ddot{y}(t)_n + 2\zeta_n\omega_n\dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t)_n = \sum_{j=1}^{J} p_{nj}g(t)_j \tag{6.23}$$

Üç boyutlu deprem yüklemesi için Denklem 6.23'ün sağ tarafı Denklem 6.24'te verildiği gibi yazılmaktadır. Denklemdeki kütle katılım oranı Denklem 6.26'dan elde edilmektedir. Denklemde p_{nj} modal katılım oranını göstermektedir. Modal katılım oranı denklem 6.25'ten elde edilmektedir.

$$\sum_{j=1}^{J} p_{nj}g(t)_j = p_{nx}\ddot{u}(t)_{gx} + p_{ny}\ddot{u}(t)_{gy} + p_{nz}\ddot{u}(t)_{gz} \tag{6.24}$$

$$p_{nj} = -\Phi_n^T\mathbf{M}_j \tag{6.25}$$

6.2.2.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri

Yapısal sistemlerin dinamik davranışını idare eden hareket denklemlerinin çözümü için genel yaklaşım, sayısal integrasyon yöntemlerinden yararlanmaktır.

Bu yöntemlerde dinamik denge denklemleri farklı zaman adımları için sayısal olarak çözülür ve bu şekilde yapının davranışı elde edilir. Genelde bu yöntemlerde eşit zaman aralıkları kullanır. Sayısal integrasyon yöntemleri direkt ve dolaylı yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Direkt yöntemde, diferansiyel denklemin t anındaki çözümünden elde edilen sonuçlar, $(t + \Delta t)$ anındaki diferansiyel denklem çözümünde kullanmaktadır. Bu yöntemlerde daha küçük zaman adımlarının kullanılması çözümün sağlıklı olması açısından önemlidir. Dolaylı yöntemlerde, $(t - \Delta t)$ anında elde edilen sonuçların t anında diferansiyel denklemi sağlayıp sağlamadığı denenerek iterasyonlara devam edilmektedir. Bu yöntemlerde ise daha büyük zaman adımlarının kullanabilmesi mümkündür. SAP2000 programında kullanılan sayısal integrasyon yöntemleri bu bölümde değerlendirilmektedir.

1) Newmark Sayısal İntegrasyon Yöntemi

Bu yöntem 1959 yılında Newmark tarafından şok ve sismik yükler etkisi altında yapıların dinamik olarak çözümü için sunulmuştur. Newmark yöntemi daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiş olup ve modifiye edilmiştir (Wilson, 2002). Bu yöntemde Denklem 6.26'da verilen doğrusal dinamik denge denklemi adım adım çözümlenmektedir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K}\mathbf{u}_t = \mathbf{F}_t \tag{6.26}$$

Dinamik denge denkleminin çözümü için Taylor serilerini doğrudan kullanarak Denklem 6.27 ve Denklem 6.28 elde edilmektedir.

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^3}{6}\dddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \cdots \tag{6.27}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \cdots \quad (6.28)$$

Newmark yönteminde Denklem 6.27 ve Denklem 6.28 üçüncü derece türev teriminden itibaren kesilmiş olup ve yeni denklemler β ve γ katsayıları tanımlanarak Denklem 6.29 ve Denklem 6.30'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta\Delta t^3\ddot{\mathbf{u}} \quad (6.29)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \gamma\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}} \quad (6.30)$$

Eğer zaman diliminde ivme değişimi doğrusal olarak kabul edilirse Denklem 6.31'de verilen eşitlik kabul edilebilmektedir.

$$\ddot{\mathbf{u}} = \frac{(\ddot{\mathbf{u}}_t - \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (6.31)$$

Denklem 6.31, Denklem 6.29 ve Denklem 6.30'da yerine yazılırsa Newmark yönteminin standart formu Denklem 6.32 ve Denklem 6.33'te verildiği gibi elde edilir.

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (\frac{1}{2} - \beta)\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_t \quad (6.32)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (1-\gamma)\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \gamma\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_t \quad (6.33)$$

Newmark yönteminde yapı sisteminin her bir deplasman serbestlik derecesi için Denklem 6.32 ve Denklem 6.33 kullanılarak Denklem 6.26 adım adım çözülmektedir ve sonuçlar elde edilmektedir. Wilson tarafından Newmark

Yönteminin matris formülasyonu yapılmış olup ve rijitlik ve kütle orantılı sönüm eklenerek revize edilmiştir (Wilson, 2002). Bu durumda ivme ve hız denklemleri Denklem 6.34 ve Denklem 6.35'te verildiği gibi elde edilmektedirler.

$$\ddot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t}} = b_1(\mathbf{u}_{\mathrm{t}} - \mathbf{u}_{\mathrm{t-\Delta t}}) + b_2\dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t-\Delta t}} + b_3\ddot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t-\Delta t}} \tag{6.34}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t}} = b_4(\mathbf{u}_{\mathrm{t}} - \mathbf{u}_{\mathrm{t-\Delta t}}) + b_5\dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t-\Delta t}} + b_6\ddot{\mathbf{u}}_{\mathrm{t-\Delta t}} \tag{6.35}$$

Denklemlerdeki b_i sabitleri Denklem 6.36'da verilen eşitliklerden elde edilmektedirler.

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{\beta\Delta \mathrm{t}^2} \qquad b_2 = \frac{1}{\beta\Delta \mathrm{t}} \qquad b_3 = \beta - \frac{1}{2} \\ b_4 &= \gamma\Delta \mathrm{t} b_1 \qquad b_5 = 1 + \gamma\Delta \mathrm{t} b_2 \quad b_6 = \Delta \mathrm{t}(1 + \gamma b_3 - \gamma) \end{aligned} \tag{6.36}$$

Denklem 6.34, Denklem 6.35 ve Denklem 6.36, Denklem 6.26'da yerine yazılırsa Denklem 6.37 elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u}_t = \mathbf{F}_t &+ \mathbf{M}(b_1\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_2\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_3\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) \\ &+ \mathbf{C}(b_4\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_5\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_6\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) \end{aligned} \tag{6.37}$$

Denklem 6.37'de $\bar{\mathbf{K}}$ efektif dinamik rijitlik matrisi olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 6.38'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + b_1\mathbf{M} + b_4\mathbf{C} \tag{6.38}$$

Sıfır sönüm durumu için Newmark yöntemi aşağıda verilen denklemler sağlanırsa stabil olmaktadır. Denklemde ω_{max} yapı sisteminin maksimum frekansını gstermektedir.

$$\gamma \geq \frac{1}{2}, \beta \leq \frac{1}{2} \qquad \text{ve} \qquad \Delta t \leq \frac{1}{\omega_{max}\sqrt{\gamma/_2 - \beta}}$$

Ayrıca Newmark yönteminde aşağıdaki denklem sağlanırsa yöntem şartsız olarak stabil hale gelmektedir.

$$2\beta \geq \gamma \geq \frac{1}{2}$$

Ancak γ' nın $\frac{1}{2}$'den büyük olması çözümde bazı hatalara neden olmaktadır. Bu hatalar sayısal sönümleme ve periyod uzaması sonucunda oluşmaktadırlar. Çok serbestlik dereceli yapıların çözümün stabil olması açısında zaman adımının doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Bu tip yapılar için zaman adımının seçiminde kullanılan kriter Denklem 6.39'da verilmektedir (Wilson, 2002). Denklemde Δt zaman adımı ve T_{MIN} yapının en küçük periyodunu göstermektedir.

$$\frac{\Delta t}{T_{MIN}} \leq \frac{1}{2\pi\sqrt{\gamma/_2 - \beta}} \tag{6.39}$$

2) Ortalama İvme Yöntemi

Ortalama ivme yöntemi, ikinci mertebe diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için trapez kuralına dayanan bir sayısal integrasyon yöntemidir. Bu yöntemde çözüm Denklem 6.40'ta verilen Taylor serisini kullanılarak gerçekleşmektedir. Denklem 6.40'ta, τ zaman adımları içinde değişken bir

noktadır. Hız ise Denklem 6.40'ın türevi alınarak Denklem 6.41'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\mathbf{u}_\tau = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \tau\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^2}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^3}{6}\dddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \ldots\ldots$$

$$\approx \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \tau\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^2}{2}\left(\frac{\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \ddot{\mathbf{u}}_t}{2}\right) \tag{6.40}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \tau\left(\frac{\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \ddot{\mathbf{u}}_t}{2}\right) \tag{6.41}$$

Denklem 6.40 ve Denklem 6.41'de eğer $\tau = \Delta t$ olursa, deplasman ve hız Denklem 6.42 ve Denklem 6.43'te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{4}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{4}\ddot{\mathbf{u}}_t \tag{6.42}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\mathbf{u}}_t \tag{6.43}$$

Bu denklemler, $\gamma = 1/2$ ve $\beta = 1/4$ için Newmark denklemleriyle aynı olmaktadır.

3) Wilson θ Faktörü Yöntemi

Wilson yönteminde, genel Newmark yöntemi θ faktörü tanımlanarak revize edilmektedir ve bu şekilde şartsız olarak stabil hale gelmektedir. Yöntemde zaman adımı Δt, θ ile düzenlenmektedir ve Denklem 6.44'te verildiği gibi düzenlenmiş zaman adımı $\Delta t'$ ile gösterilmektedir. Düzenlenmiş yük ise Denklem 6.45'te verilmektedir. Denklemlerde $\theta \geq 1$ olmalıdır.

$$\Delta t' = \theta \Delta t \tag{6.44}$$

$$R_{t'} = R_{t-\Delta t} + \theta(R_t - R_{t-\Delta t}) \tag{6.45}$$

Wilson yönteminde, ivme vektörü, $\ddot{\mathbf{u}}_{t'}$, $\theta\Delta t$ zaman adımında Newmark yöntemini kullanılarak hesaplandıktan sonra, ivme, hız ve deplasman değerleri Denklem 6.46, Denklem 6.46 ve Denklem 6.48'den elde edilmektedir. θ faktörünün kullanılması, sistemin yüksek modlarını sayısal olarak sönümlemektedir. Bu yüzden yüksek modların önemli olduğu yapılar için elde edilen sonuçlar hatalı olabilmektedir (Wilson, 2002).

$$\ddot{\mathbf{u}}_t = \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \frac{1}{\theta}(\ddot{\mathbf{u}}_{t'} - \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) \tag{6.46}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (1-\gamma)\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{t-\Delta t}} + \gamma\Delta t\ddot{u}_t \tag{6.47}$$

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_{\mathbf{t-\Delta t}} + \frac{\Delta t^2(1-2\beta)}{2}\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_t \tag{6.48}$$

4) Hilber, Hughes ve Taylor α Yöntemi

Bu yöntemde, α katsayısı ile modifye edilen dinamik denge denklemi, Newmark yöntemi ile çözülmektedir. Modifye edilmiş olan dinamik denge denklemi, Denklem 6.49'da verilmektedir. α katsayısı sıfıra eşit olduğunda yöntem Newmark Yöntemine dönüşmektedir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_t + (1+\alpha)\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_t + (1+\alpha)\mathbf{K}\mathbf{u}_t = (1+\alpha)\mathbf{F}_t - \alpha\mathbf{F}_t + \alpha\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \alpha\mathbf{K}\mathbf{u}_{t-\Delta t} \tag{6.49}$$

6.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan (Nonlineer) Dinamik Analiz

Yapıların büyük dinamik etkilere karşı verdikleri tepki, genelde önemli ölçüde doğrusal olmayan davranışları içermektedir. Doğrusal olmayan davranış genel olarak büyük deplasmanlar ve/veya doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin etkisinde oluşmaktadır. Sap2000 yazılımında aşağıda verilen doğrusal olmayan davranışlarının dikkate alınması mümkündür.

- Link/Mesnet elemanlarının çeşitli doğrusal olmayan özellikleri
- Frame elemanlarında çekme ve/veya basınç sınırları
- Frame elemanlarında plastik mafsallar
- Kablo elemanlarında geometrik doğrusal olmayan özellikleri
- Katmanlı Shell elemanlarında malzeme doğrusal olmayan özellikleri
- $P-\Delta$ etkisi
- Büyük deplasman etkileri

Yukarıda verilen ilk beş özellik malzeme doğrusal olmayan davranışı ve son iki özellik ise geometrik doğrusal olmayan davranış olarak tanımlanmaktadır.

Programda zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, modal doğrusal olmayan analiz yöntemi veya direk integrasyon yöntemi ile yapılmaktadır. Doğrusal olmayan direk integrasyon analiz yönteminde tüm malzeme ve geometrik doğrusal olmayan durumların dikkate alınması mümkündür. Ancak doğrusal olmayan modal analizde sadece Link elemanlarının doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmaktadır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleri aşağıda incelenmektedirler.

6.3.1. Doğrusal Olmayan (Nonlineer) Modal Analiz veya Hızlı Nonlineer Analiz

SAP2000 programında kullanılan doğrusal olmayan Modal Analiz yöntemi Wilson (2002) tarafından geliştirilmiş olan Hızlı doğrusal olmayan Analiz

yöntemine dayanmaktadır. Yöntem, özellikle genel olarak doğrusal elastik davranışa ve sınırlı sayıda önceden tanımlanmış lokal doğrusal olmayan elemanlara sahip olan yapısal sistemler çözümü için son derece etkilidir. Modal doğrusal olmayan analiz yönteminde yapı sistemindeki doğrusal olmayan davranış sadece Link elemanı için tanımlanmaktadır.

Bu yöntemde yapı sisteminin t zamanındaki hareket denklemi Denklem 6.50'de verilen matris denklemi ile ifade edilir. Denklemde **M**, **C** ve K, sırasıyla, kütle, sönüm ve elastik rijitlik matrislerini göstermektedirler.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}(t)_{\mathrm{NL}} = \mathbf{R}(t) \tag{6.50}$$

Bu üç kare matrisin boyutu, bilinmeyen düğüm noktası deplasmanlarının toplam sayısı, N_d' ye eşittir. Elastik rijitlik matrisine doğrusal olmayan elemanların rijitliği dahil edilmemektedir. Denklemde $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ ve $\mathbf{R}(t)$ düğüm noktası ivme, hız, deplasman ve dış yükler vektörleridir. $\mathbf{R}(t)_{\mathrm{NL}}$ ise toplam doğrusal olmayan kuvvetler vektördür ve her iterasyonda hesaplanmaktadır.

Bilgisayar modelinin doğrusal olmayan elemanlar dahil edilmeden stabil olmaması durumunda Denklem 6.50'nin her iki tarafına efektif elastik yükler ilave edilir. Bu durumda doğrusal olmayan dinamik denge denklemi Denklem 6.51'de verildiği gibi ifade edilmektedir. Denklemde $\mathbf{K}_{\mathrm{e}}\mathbf{u}(t)$ keyfi değere sahip olan efektif elastik yükü göstermektedir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_{\mathrm{e}})\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{R}(t)_{\mathrm{NL}} + \mathbf{K}_{\mathrm{e}}\mathbf{u}(t) \tag{6.51}$$

Denklem 6.51'i dikkate alarak doğrusal olmayan modelin dinamik denge denklemi kesin olarak Denklem 6.52'de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{R}}(t) \tag{6.52}$$

Denklemde elastik rijitlik matrisi $\overline{\mathbf{K}}$, $\mathbf{K} + \mathbf{K}_e$' ye eşittir ve bilinmektedir.

Efektif dış yükler $\overline{\mathbf{R}}(t)$, $\mathbf{R}(t) - \mathbf{R}(t)_{\mathrm{NL}} + \mathbf{K}_e\mathbf{u}(t)$' ye eşittir. Denklem 6.52' modal analiz yöntemini kullanarak çözülmektedir.

6.3.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri

Doğrusal olmayan sistemlere ait hareket denklemlerinin çözümü, modal analiz yöntemini kullanılmadan direkt integrasyon yöntemleri ile SAP2000 programında yapılabilmektedir. Modal doğrusal olmayan analiz yöntemi genellikle daha doğru ve verimli olsa da, direk integrasyon yöntemi aşağıda verilen avantajlara sahiptir.

- Şok ve dalga yayılım problemlerinin çözümünde daha etkili bir yöntemdir.
- SAP2000 programında bulunan tüm doğrusal olmayan durumların dikkate alınması mümkündür.

Direk integrasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar zaman adımından etkilenmektedirler ve bu sonuçların doğruluğu büyük oranda zaman adımının doğru seçilmesine bağlıdır. Bu yüzden direk integrasyon yönteminde zaman adımını sonuçlar birbirine oldukça yakın olana kadar sürekli olarak küçültmek gerekmektedir.

6.4. Sönüm Modelleri

Sönüm dinamik hareket esnasında yapının enerji tüketim kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Yapılardaki sönümümün miktarı, malzeme özellikleri, birleşimlerin tipi ve yapının hızı gibi faktörlere bağlıdır. Sönüm, kritik sönümün bir yüzdesi olarak ölçülür. Dinamik sistemlerde kritik sönüm, titreşimi tamamen önlemek için gereken minimum sönüm miktarına denir. En önemli sönüm kaynakları aşağıda verilmektedir.

- Dış viskoz sönüm
- İç viskoz sönüm
- Sürtünme sönümü veya Coulomb sönümü
- Histeritik sönüm

Dış viskoz sönüm binanın çevresindeki havanın etkisinde oluşmaktadır. Havanın viskozitesi düşük olduğu için etkisi ihmal edilebilmektedir. İç viskoz sönüm, malzeme viskozitesinden dolayı oluşmaktadır ve yapının hızı ve frekansı ile orantılıdır. Sürtünme sönümü, yapının birleşim noktalarında oluşur, sabit bir değere sahiptir ve yapının hızı ve deplasmanından bağımsızdır. Histeritik sönüm özellikle sünek yapılarda anlam kazanmaktadır ve bu yapılarda emilen enerjinin büyük bir kısmını tüketmektedir. Tüm sönüm kaynaklarını hıza bağlı viskoz sönüm olarak bir arada toplamak yaygın bir uygulamadır (Taranath, 2015).

Yapı mühendisliğinde hıza bağlı viskoz sönüm gerçek yapı sistemleri için hesaplanması oldukça zordur. Sadece sınırlı sayıda sönüm elemanına sahip yapıların ölçülebilmektedir. SAP2000 programında yapısal sistemlerin hıza bağlı viskoz sönümü, modal sönüm veya kütle ve rijitlik orantılı Rayleigh sönüm modeli ile modellenmektedir. Yapıların doğrusal olmayan artımsal analizinde kullanılan en yaygın sönüm modelinde, sönümün kütle ve rijitlik matrisleri ile orantılı olduğu varsaymaktır. Bu model Denklem 6.53'te verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{C} = \eta\mathbf{M} + \delta\mathbf{K} \tag{6.53}$$

Denklemde $\mathbf{M}$ kütle matrisini, $\mathbf{K}$ rijitlik matrisini, η ve δ ise kütle ve rijitliğin katkılarının gösteren katsayıları göstermektedirler. Rijitlik ve kütle orantılı sönüm modeli Rayleigh sönüm modeli olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal olmayan Modal Analiz yönteminde modal denklemlerin girişimsiz olması için sönüm matrisi Denklem 6.54'te verilen özelliklere sahip olması gerekmektedir. Denklemde n ve m mod numaralarını göstermektedirler.

$$2\omega_n\zeta_n = \phi_n^T\mathbf{C}\phi_n = \eta\phi_n^T\mathbf{M}\phi_n + \delta\phi_n^T\mathbf{K}\phi_n$$

$$0 = \phi_n^T\mathbf{C}\phi_n \qquad n \neq m \tag{6.54}$$

Kütle ve rijitlik matrislerini ortogonal olduğundan dolayı Denklem 6.54 Denklem 6.55 gibi yazılabilmektedir. Yapı sisteminin i ve j frekansları için sönüm katsayısı belirlenebilirse Denklem 6.55'e göre elde edilen Denklem 6.56'ten, η ve δ katsayılarını hesaplanabilmektedir.

$$\zeta_n = \frac{1}{\omega_n}\eta + \frac{\omega_n}{2}\delta \tag{6.55}$$

$$\begin{bmatrix}\xi_i \\ \xi_j\end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\eta \\ \delta\end{bmatrix} \tag{6.56}$$

Eğer her iki frekans için sönüm oranı eşit ise, kütle ve rijitlik katılım katsayıları Denklem 6.27'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\xi_i = \xi_i = \xi_i => \qquad \left\{\begin{array}{l}\delta = \dfrac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \\ \\ \eta = \omega_i\omega_j\delta\end{array}\right\} \tag{6.57}$$

6.5. SAP2000 Programı ile Yapı-Zemin Etkileşimi Analizi

SAP2000 programı ile dinamik yapı-zemin etkileşimi analizinin teorik temeli ve modelleme tekniklerine bu bölümde yer verilmektedir. Konu ile ilgili olarak zemin Sonlu Eleman modelinde kullanılan elemanlar ve dinamik analiz yöntemleri incelenmektedir.

6.5.1. Zemin Tepki Analizi

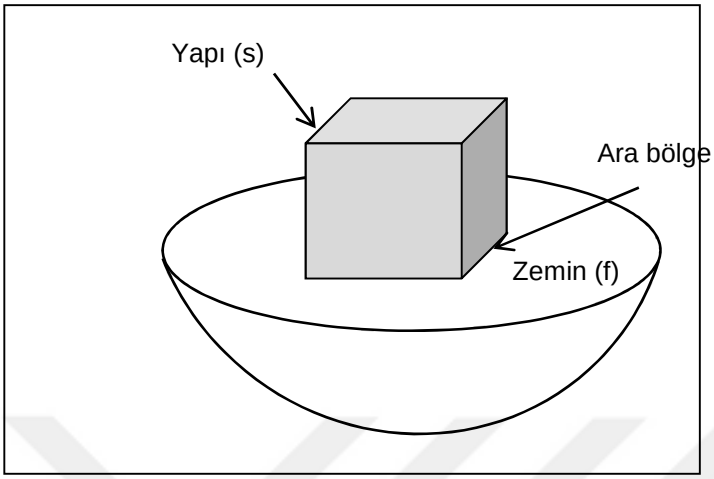
Zemin malzemesi doğrusal kabul edilirse, SAP2000 programı Solid elemanı kullanarak bir yapının tabanındaki bir, iki veya üç boyutlu serbest-alan hareketlerini hesaplayabilir. Ancak doğrusal olmayan zemin durumu için HNA yöntemi kullanılarak tek boyutlu analizi yapılabilir (Wilson, 2002).

6.5.2. Yapı-Zemin Etkileşimi

SAP2000 programında yapı-zemin etkileşimi analizi Eklenmiş Hareket formülasyonuna göre yapılmaktadır (Wilson, 2002). Bu formülasyon matematiksel olarak basit, teorik olarak kusursuz ve bir doğrusal yapısal analiz programı içinde kullanımı kolaydır. Temel yapı-zemin etkileşimi dinamik denge denklemlerini geliştirmek için, Şekil 6.8'de gösterilen üç boyutlu yapı-zemin sistemini dikkate alınmaktadır.

Yapı-zemin modeli üç tip düğüm noktasından oluşmaktadır. Yapı düğüm noktaları s ile zemin düğüm noktaları f ile ve yapı-zemin ara bölgesi düğüm noktaları c ile gösterilmektedir. Sistemin dinamik denge denklemi mutlak deplasmanlar U' ya göre Denklem 6.58'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{cc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_s \\ \ddot{\mathbf{U}}_c \\ \ddot{\mathbf{U}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sf} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{cf} & \mathbf{K}_{cc} & \mathbf{K}_{cf} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{fc} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_s \\ \mathbf{U}_c \\ \mathbf{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \qquad (6.58)$$



Şekil 6.8. Üç boyutlu yapı-zemin etkileşimi şematik modeli

Zemin ve yapı arasındaki ara bölgesinin kütle ve rijitliğinde zemin ve yapının katkısı bulunmaktadır. Ara bölgenin kütle ve rijitliği Denklem 6.59'dan elde edilmektedir.

$$\mathbf{M}_{cc} = \boldsymbol{M}_{cc}^{(s)} + \mathbf{M}_{cc}^{(f)} \quad \text{ve} \quad \mathbf{K}_{cc} = \mathbf{K}_{cc}^{(s)} + \mathbf{K}_{cc}^{(f)} \tag{6.59}$$

Bu yapı-zemin etkileşimi probleminin direk olarak çözmemek için, üzerinde yapı olmayan zeminin dinamik tepkisi hesaplanmaktadır. Çoğu durumda, söz konusu serbest zemin analizi basit tek boyutlu analiz ile elde edilebilir. Üç boyutlu serbest zemin çözümü mutlak yer deplasman **v** ve mutlak hız **v̈** ile gösterilir. Denklem 6.60'da verildiği gibi mutlak deplasmanlar **U** ve ivme **Ü**' yi serbest zemin deplasmanları **v** 'ye göre ifade etmek mümkündür.

$$\begin{bmatrix}\mathbf{U}_s\\ \mathbf{U}_c\\ \mathbf{U}_f\end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix}\mathbf{u}_s\\ \mathbf{u}_c\\ \mathbf{u}_f\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{v}_s\\ \mathbf{v}_c\\ \mathbf{v}_f\end{bmatrix} \qquad \text{ve} \qquad \begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{U}}_s\\ \ddot{\mathbf{U}}_c\\ \ddot{\mathbf{U}}_f\end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{u}}_s\\ \ddot{\mathbf{u}}_c\\ \ddot{\mathbf{u}}_f\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{v}}_s\\ \ddot{\mathbf{v}}_c\\ \ddot{\mathbf{v}}_f\end{bmatrix} \tag{6.60}$$

Bu durumda Denklem 6.58, Denklem 6.61'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{cc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s \\ \ddot{\mathbf{u}}_c \\ \ddot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sf} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{cf} & \mathbf{K}_{cc} & \mathbf{K}_{cf} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{fc} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_c \\ \mathbf{u}_f \end{bmatrix} =$$

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{cc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{v}}_s \\ \ddot{\mathbf{v}}_c \\ \ddot{\mathbf{v}}_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sf} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{cf} & \mathbf{K}_{cc} & \mathbf{K}_{cf} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{fc} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_f \end{bmatrix} = \mathbf{R} \tag{6.61}$$

Serbest zemin deplasmanı $\mathbf{v}_c$, yapı tabanı boyunca sabit olduğu durumda, $\mathbf{v}_s$ yapının katı cisim hareketidir. Bu durumda Denklem 6.61, Denklem 6.62'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sc} \\ \mathbf{K}_{cs} & \mathbf{K}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{6.62}$$

Ayrıca dinamik serbest zemin hareketi Denklem 6.63'ten elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{cc}^{(f)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{v}}_c \\ \ddot{\mathbf{v}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{cc}^{f} & \mathbf{K}_{cf} \\ \mathbf{K}_{cf} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{6.63}$$

Bu nedenle Denklem 6.61'in sağ tarafı Denklem 6.64'te verildiği gibi yazılır.

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{cc}^{(s)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{v}}_s \\ \ddot{\mathbf{v}}_c \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{6.64}$$

Görüldüğü gibi Denklem 6.64'ün sağ tarafı temelin kütlesini içermemektedir. Bu yüzden yapı-zemin sisteminin üç boyutlu dinamik denge denklemi, Denklem 6.65'te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{M\ddot{u}} + \mathbf{C\dot{u}} + \mathbf{Ku} = -\mathbf{m_x}\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{x}(t) - \mathbf{m_y}\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{y}(t) - \mathbf{m_z}\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{z}(t) \quad (6.65)$$

Denklem 6.65'te **M**, **C** ve **K** yapı-zemin sisteminin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\mathbf{m_i}$ matrisleri ise üstyapı kütlesini göstermektedirler. $\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{x}(t)$, $\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{y}(t)$ ve $\ddot{\mathbf{v}}_\mathbf{z}(t)$ serbest zemin ivmelerini ifade etmektedirler.

Yapısal analiz bilgisayar programlarının çoğu, sismik yüklemeyi bilgisayar modeli içindeki tüm kütle serbestlik derecelerine otomatik olarak uygular ve yapı-zemin etkileşimi problemini çözemez. Bu eksiklik, kütlesiz zemin modelinin gelişimine sebep olmuştur. Bu durum sismik yüklerin yapıya direk olarak uygulanmasına ve zeminde oluşan atalet kuvvetlerinin ihmal edilmesine sebep olur. SAP2000 programında yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için sadece zemin kütlesini tanımlamak gerekir. Program toplam kütle ve eklenmiş üstyapı kütlesini dikkate alarak yapı-zemin etkileşimi analizini doğru bir şekilde yapmaktadır (Wilson, 2002).

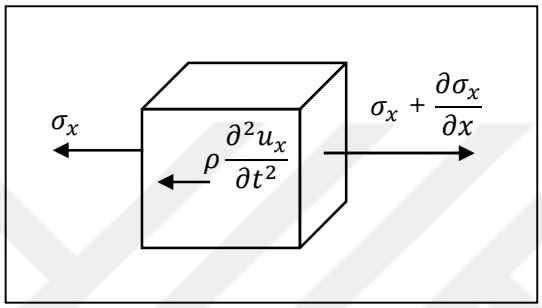
SAP2000 programında yapı-zemin etkileşimi çalışmalarında zemin malzemesi doğrusal kabul edilirse, Solid elemanı kullanarak bir yapının tabanındaki bir, iki veya üç boyutlu serbest alan hareketlerini hesaplanabilir. Ancak zeminin davranışı doğrusal olmayan ise, Hızlı doğrusal olmayan Analiz (HNA) yöntemi ile tek boyutlu doğrusal olmayan bir analizi yapılabilir (Wilson, 2002).

6.5.3. Yapı-Zemin Etkileşimi Analizi İçin Viskoz Sınırların tanımlanması

Sonlu Eleman modelinde yakın bölge zemin boyutlarının büyük olması durumunda sabit zemin sınırları ile doğru çözüme ulaşmak mümkündür. Ancak bu durum modelin boyutunu oldukça arttırır. Daha küçük bir zemin modelini dikkate

almak için yakın bölge zemin sınırlarında enerji söndürme özelliğine sahip olmaları gerekmektedir. Bu sınırlar viskoz zemin sınırları olarak tanımlanmaktadırlar.

Viskoz zemin sınırı özelliklerini incelemek için, x yönünde ilerleyen bir düzlem dalga dikkate alınmaktadır. Dalga yayılımına neden olan kuvvetler, Şekil 6.9'da bir birim küp üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Birim küpe etki eden kuvvetler

Birim küpün x yönündeki tek boyutlu denge denklemi Denklem 6.66'da verilmektedir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \tag{6.66}$$

$\sigma_x = \lambda \varepsilon_x = \lambda \frac{\partial u}{\partial x}$ eşitliğini dikkate alarak, Denklem 6.78'de verilen tek boyutlu kısmi diferansiyel denklem, Denklem 6.67'de verildiği gibi klasik dalga yayılımı denklemi şeklinde yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - V_p^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = 0 \tag{6.67}$$

Denklem 6.67'de, V_p dalga yayılmı hızıdır ve Denklem 6.68'den elde edilmektedir.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \tag{6.68}$$

Denklem 6.68'de, ρ zemin kütlesel yoğunluğu, λ ise bulk modülüdür. Bulk modülü, Denklem 6.69'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda = \frac{1-\upsilon}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}E \tag{6.69}$$

Harmonik bir dalga yayılımı için Denklem 6.67'in çözümü, Denklem 6.70 gibidir. Denklemde ω harmonik hareketin frekansıdır. Hız ise Denklem 6.71'den elde edilmektedir.

$$u(t,x) = U\left[\sin(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}) + \cos(\omega t - \frac{\omega x}{V_p})\right] \tag{6.70}$$

$$\dot{u}(t,x) = U\omega\left[\cos(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}) - \sin(\omega t - \frac{\omega x}{V_p})\right] \tag{6.71}$$

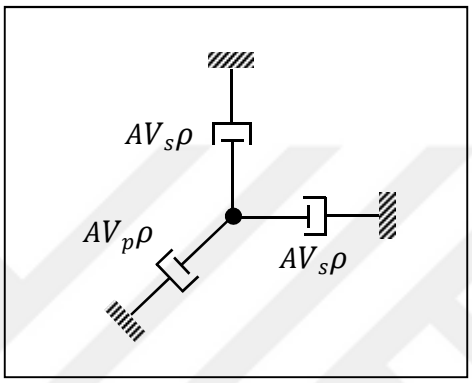
Denklem 6.70 ve Denklem 6.71 dikkate alınarak x yönündeki şekil değiştirme Denklem 6.72'de, gerilme ise Denklem 6.73'te verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\varepsilon(x,t) = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\dot{u}(x,t)}{V_p} \tag{6.72}$$

$$\sigma(x,t) = \lambda\varepsilon(x,t) = -V_p\rho\dot{u}(x,t) \tag{6.73}$$

Viskoz zemin sınırındaki basınç gerilmesi, sönüm oranı $V_p\rho$ olan basit viskoz sönüm elemanının birim alana etki eden kuvvetine eşittir. Sınıra paralel

olarak kesme gerilmeleri ise sönüm oranı $V_s\rho$ olan viskoz sönüm elemanının birim alana etki eden kuvvetine eşittir. Bu şekilde dalga yansıması olmadan dalga geçmesine izin verecek bir yapay veya geçirgen sınır durumu yaratılabilir. Viskoz sınırlarda tanımlanan sönüm elemanlarının özellikleri Şekil 6.10'da verilmektedir.



Şekil 6.10. Viskoz geçirgen sınırda tanımlanan sönüm elemanları

6.6. Sayısal Modellemenin Özeti

Bu bölümde, çalışmadaki sistemin sayısal modellemesi incelenmiş olup, Sonlu Eleman modelinde kullanılan elemanlar ve analiz yöntemleri değerlendirilmiştir. Sonlu Eleman modelinde üstyapıda bulunan kiriş, kolon ve çaprazlar için kullanılan Frame elemanı, döşeme ve temel plakası için kullanılan Shell elemanı, yakın bölge zemin modellenmesi için kullanılan Solid elemanı ve elastomerik sismik izolatörler ve zemin-temel bağlantısı için kullanılan doğrusal olmayan Link elamanları incelenmiştir.

Modelde, üstyapı davranışının nonlineer olduğu, zemin davranışının doğrusal olduğu ve elastomerik sismik izolatör ve zemin-temel bağlantı elemanlarının ise, doğrusal olmayan davranışa sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu bölümde doğrusal olmayan sistemlerin zaman tanım alanında analiz yöntemleri incelenmiştir ve sayısal integrasyon yönteminin çalışmadaki modelin analizi için

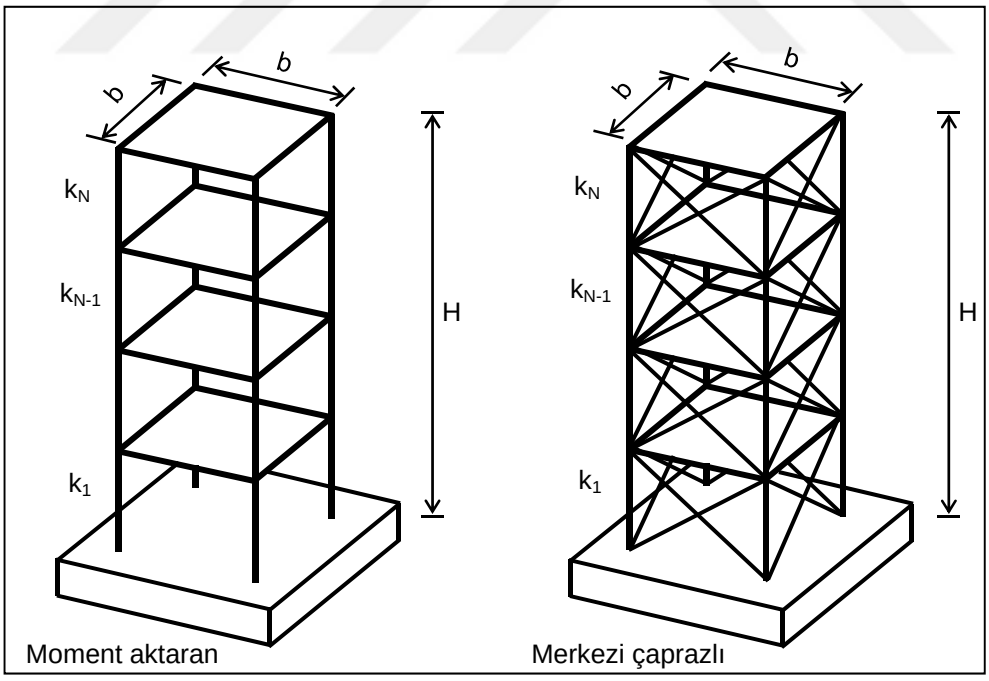
uygun olduğuna karar verilmiştir. Gerçekleşen analizlerden elde edilen sonuçlar detaylı olarak bölüm 7'de sunulmaktadır.

7. UYGULAMALAR VE ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın amacına yönelik yapılan uygulamalar ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır. Uygulamalarda, incelenmekte olan yapısal modellerin sismik davranışı, değişik deprem ivme kayıtları, sismik izolatör tipleri ve zemin özellikleri dikkate alınarak elde edilmektedir. Analizler, serbest titreşim analizi ve zaman tanım alanında sismik analiz olmak üzere iki durum için gerçekleştirilecektir.

7.1. Uygulamada Kullanılan Yapısal Modeller

Uygulamada, moment (MF) ve merkezi çaprazlı (BF) olmak üzere toplam 6 adet, üç boyutlu çelik yapı modeli incelenmektedir. Modeller tek açıklıklı olup, farklı kat adetlerine sahipler. Dört, altı ve sekiz katlı olan bu modeller şematik olarak Şekil 7.1'de gösterilmektedirler.



Şekil 7.1. Moment aktaran ve merkezi çaprazlı çelik yapı modelleri

Yapısal modellerin geometrik özellikleri Çizelge 7.1'de verilmektedir. Burada H, yapısal modelin toplam yüksekliğini, b ise, modelin açıklığını göstermektedir.

Çizelge 7.1. Yapısal modellerinin geometrik özellikleri

Model	Yük taşıma sistemi	Kat adeti	Kat yüksekliği (cm)	H (cm)	b (cm)
MF4	Moment aktaran	4	300	1200	500
MF6	Moment aktaran	6	300	1800	500
MF8	Moment aktaran	8	300	2400	500
BF4	Merkezi çaprazlı	4	300	1200	500
BF4	Merkezi çaprazlı	6	300	1800	500
BF8	Merkezi çaprazlı	8	300	2400	500

Modellerin analizi ve tasarımı SAP2000 hazır paket programı ile yapılmaktadır. Bilgisayar modelinde kiriş, kolon ve çaprazlar için Frame elemanı, temel için Solid elemanı ve döşemeler için Shell elemanı kullanılmaktadır. Yapısal tasarımlar, zati, hareketli ve deprem yükleri dikkate alınarak ANSI/AISC 360-10 (2010) yönetmeliği ve LRFD (Yük ve Dayanım Katsayıları ile tasarım) yöntemine göre yapılmaktadır. Çelik malzeme özellikleri Çizelge 7.2'de verilmektedir. Çizelgede w_{st}, birim ağırlığı; ρ_{st}, kütlesel yoğunluğu, E_{st} elastisite modülünü; ν_{st} Poisson oranını, F_{yst} akma mukavemetini ve F_{ust} kopma mukavemetini göstermektedir.

Çizelge 7.2. Yapısal modellerde kullanılan çelik malzeme özellikleri

Malzeme	w_{st} (kN/m^3)	ρ_{st} (ton/m^3)	E_{st} (MPa)	ν_{st}	F_{yst} (MPa)	F_{ust} (MPa)
S235JR	76.9	7.84	210000	0.3	235	360
S275JR	76.9	7.84	210000	0.3	275	430

Temel ve döşemede kullanılan betonun sınıfı ve özellikleri Çizelge 7.3'te verilmektedir. Çizelgede w_c, birim ağırlığı; ρ_c kütlesel yoğunluğu; E_c elastisite modülünü; ν_c Poisson oranını ve f_{ck} 28 günlük karakteristik dayanımı

göstermektedir. Beton özellikleri TS500 (2000) yönetmeliğine göre belirlenmektedir.

Çizelge 7.3. Temel ve döşemelerde kullanılan betonun sınıfı ve özellikleri

Beton sınıfı	w_c (kN/m^3)	ρ_c (kg/m^3)	E_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	ν_c
C30	24.99	2.54	31800	30	0.2

Yapısal tasarıma göre elde edilen kolon, kiriş ve çapraz profilleri Çizelge 7.4'te verilmektedir. Tüm modellerde 20 cm kalınlığında betonarme döşeme kullanılmaktadır. Betonarme temelin eni ve boyu 600 cm, derinliği ise, 50 cm olarak belirlenmektedir.

Çizelge 7.4. Yapısal modellerde kullanılan çelik profiller

Model	Kiriş		Kolon		Çapraz	
	Profil	Malzeme	Profil	Malzeme	Profil	Malzeme
MF4	HEA220	S275JR	HEB240	S275	-	-
MF6	HEA220	S275JR	HEB240	S275	-	-
MF8	HEA220	S275JR	HEB240	S275	-	-
BF4	HEA220	S275JR	HEB240	S275	UPN120	S235JR
BF6	HEA220	S275JR	HEB240	S275	UPN120	S235JR
BF8	HEA220	S275JR	HEB240	S275	UPN120	S235JR

7.2. Zemin Sınıfları ve Özellikleri

Yapı-zemin etkileşimi konusunda yapılan çalışmalar, zemin özelliklerinin üstyapı sismik davranışı etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle zeminde kayama dalgası yayılma hızı, V_s, bu konuda önemli bir etken olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada zemin özelliklerini dikkate almak için farklı kayma dalgası hızlarına sahip üç tip zemin sınıfı kullanılmaktadır. Zeminin kayma modülü G_s, kayma dalgası hızına göre Denklem 7.1'den elde edilmektedir (Kumar, 2008). Denklemde ρ_s, zeminin kütlesel yoğunluğunu; w_s, zeminin birim ağırlığını ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Zeminin elastisite modülü ise Denklem 7.2'ye göre hesaplanmaktadır. Denklemde ν_s zeminin Poisson oranını ifade etmektedir.

$$G_s = \rho_s V_s^2 = \frac{w_s}{g} V_s^2 \tag{7.1}$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \tag{7.2}$$

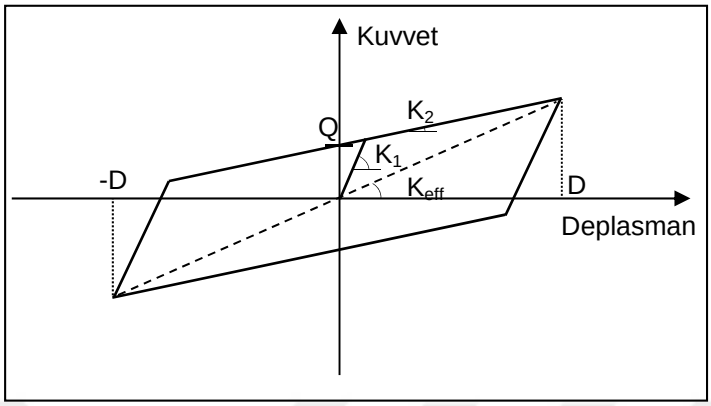
Bu çalışmada, altyapı için kullanılan zemin sınıfları ve özellikleri Çizelge 7.5'te verilmektedir. Z1 zemin sınıfı yumuşak bir zemini, Z2 zemin sınıfı orta sertlikte bir zemini ve Z3 zemin sınıfı sert bir zemini temsil etmektedir. Zeminin elastik ve lineer bir davranışa sahip olduğu varsayılmaktadır.

Çizelge 7.5. Zemin sınıfları ve özellikleri

Özellik	Zemin Sınıfları		
	Z1	Z2	Z3
Kayma dalgası hızı V_s (m/s)	150	300	600
Birim ağırlık w_s (kN/m^3)	17.5	20.7	21.5
Poisson Oranı ν_s	0.4	0.35	0.3
Kayma Modülü G_s (Mpa)	39.3	186.3	774.0
Elastisite modülü $E_s(Mpa)$	110.0	503.0	2012.4
Sönüm Oranı ξ_s	0.04	0.04	0.04

7.3. Elastomerik Sismik İzolatörlerin Özellikleri

Yapısal modeller için kullanılan elastomerik sismik izolatörlerin mekanik özellikleri Bölüm 5'te verilen bilgiler esas alınarak belirlenmektedir. Sismik izolatörlerin davranışının nonlineer olduğu ve nonlineer davranışın Şekil 7.2'de verildiği gibi bilineer modele uyduğu kabul edilmektedir.



Şekil 7.2. Elastomerik sismik izolatörlerin bilineer modeli kuvvet-deplasman eğrisi

Şekilde 7.2'de Q, elastomerin akma mukavemetini, ξ_{eff} efektif sönüm oranını, K_{eff} efektif rijitliği, K_1 elastik rijitliği ve K_2 akama sonrası rijitliğini göstermektedir.

Bu çalışmada, sismik izolatör özelliklerinin üstyapı sismik davranışındaki etkisini araştırmak için iki tip izolatör kullanılmaktadır. BI2 ve BI3 ile isimlendirilen izolatörlerin doğal serbest titreşim periyodları, 2s ve 3s olarak belirlenmektedir. Belirlenmiş olan periyod değerlerini dikkate alarak elastomerik sismik izolatörler için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 7.6 ve Çizelge 7.7'de verilmektedir. Bu özellikler Sap2000 Sonlu Eleman modelinde sismik izolatör elemanları için tanımlanabilmektedir.

Çizelge 7.6. BI2 elastomerik sismik izolatörünün mekanik özellikleri

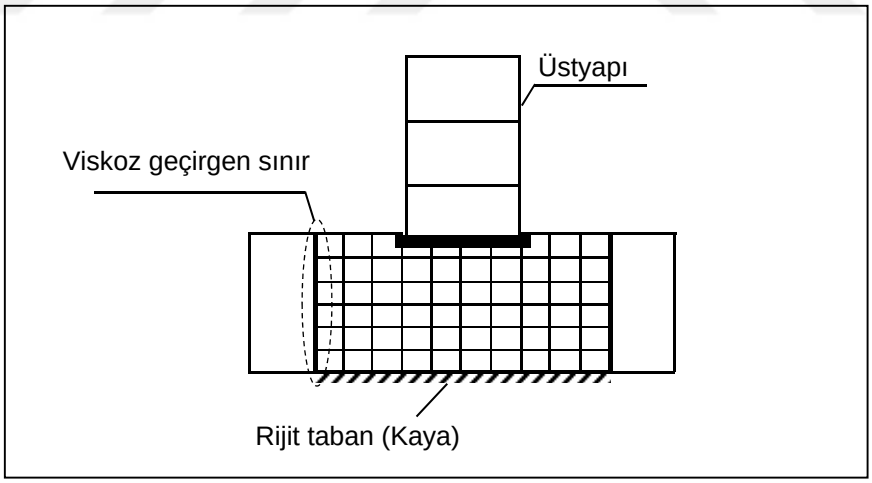
Yapı modeli	Q (kN)	ξ_{eff}	K_{eff} (kN/m)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)
MF4	4.8	0.1	248.2	2132.5	209.3
MF6	8.3	0.1	425.1	3652.1	358.4
MF8	12.7	0.1	650.0	5584.3	548.0
BF4	4.9	0.1	230.1	2148.1	210.8
BF6	6.82	0.1	349.7	3004.3	294.8
BF8	9.4	0.1	480.4	4126.9	404.9

Çizelge 7.7. BI3 elastomerik sismik izolatörünün mekanik özellikleri

Yapı modeli	Q (kN)	ξ_{eff}	K_{eff} (kN/m)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)
MF4	4.5	0.1	104.1	894.1	87.7
MF6	7.1	0.1	163.0	1400.6	137.4
MF8	10.0	0.1	288.2	1960.8	192.4
BF4	4.49	0.1	102.3	878.7	86.2
BF6	6.72	0.1	153.2	1316.2	129.2
BF8	9.07	0.1	206.8	1776.6	174.4

7.4. Sonlu Eleman Modeli

Sayısal modelde, zeminin yakın bölgesi üç boyutlu Solid elemanı ile modellenmektedir. Bu bölge geçirgen viskoz sınırlar ile uzak bölgeden ayrılmaktadır. Modelde zemin alt sınırının rijit olduğu kabul edilmektedir. Rijit alt sınır kabulü, zeminin kaya tabakası üzerinde oturduğunu göstermektedir. Zemin Sonlu Eleman modelinin şematik görünüşü iki boyutlu olarak Şekil 7.3'te verilmektedir.



Şekil 7.3. Zemin sonlu eleman modelinin şematik görünüşü

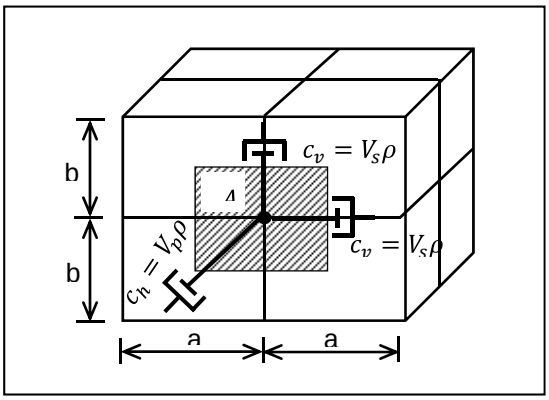
Sonlu Eleman modelinde, zemin viskoz sınırlarının yapı temelinden olan mesafesi ve bu bölgenin derinliği iki önemli etken olarak tanımlanmaktadır. Yapılan araştırmalar bu konunun elde edilen sonuçları etkileyebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada önceki deneyimlerden yararlanarak, Sonlu Eleman modelinde her üç sınıf zemin için yakın bölge zemin derinliği 12 m ve viskoz sınırların temelden mesafesi 24 m olarak belirlenmektedir.

Zemin Sonlu Eleman modelinde dikkate alınması gereken diğer bir önemli konu ise, elamanların boyutudur. Sonlu Eleman boyutunun kayma dalgasının boyu, Ω'ya göre belirlenmesi önerilmektedir. Elemanın maksimum boyunun $\Omega/8$ alınması doğru sonuçlar elde edilmesi açısından uygun olmaktadır (Krishnamoorthy ve Anita, 2016). Kayma dalgasının boyu teorik olarak Denklem 7.3'ten elde edilmektedir. Denklemde V_s kayma dalgasının hızını ve ω_s zeminin doğal serbest titreşim frekansını göstermektedir. Zeminin doğal serbest titreşim frekansı Denklem 7.4'te verildiği gibi hesaplanmaktadır. Denklemde H_s, zemin tabakasının derinliğini ifade etmektedir. Bu çalışmada Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 dikkate alınarak zeminin Sonlu Eleman modelinde tüm zemin tipleri için 150 cm×150 cm×150 cm boyutunda Sonlu Elemanlar kullanılmaktadır.

$$\Omega = \frac{V_s}{\omega_s} \tag{7.3}$$

$$\omega_s = \frac{V_s}{4H_s} \tag{7.4}$$

Yakın bölgeyi uzak bölgeden ayıran viskoz geçirgen sınırların özellikleri, bölüm 6.5.3'te verilen bilgiler dikkate alınarak belirlenmektedir. Sayısal modelde viskoz sınırların tanımlanması için sınırda bulunana düğüm noktalarına lineer link elemanı tanımlanmaktadır ve bu elemanlar için bağımsız olarak üç yönde sönüm katsayıları belirlenmektedir (Şekil 7.4).



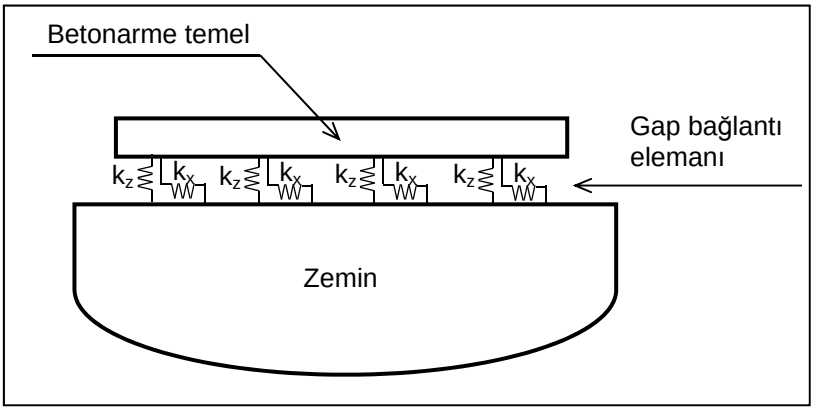
Şekil 7.4. Zemin sınırlarında tanımlanan sönüm elemanları

Zemin tipleri için elde edilen yüzeye paralel sönüm katsayısı c_v ve yüzeye dik sönüm katsayısı c_h, Çizelge 7.8'de verilmektedir. Çizelgede ρ_s, zeminin kütlesel yoğunluğunu; V_s, S dalgasının hızını; V_p, P dalgası hızını göstermektedir.

Çizelge 7.8. Geçirgen zemin sınırları için kullanılan sönüm parametreleri

Zemin sınıfı	ρ_s (kg/m^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	c_v	c_h
Z1	1784	150	250	267600	446000
Z2	2110	300	492	633000	1038120
Z3	2191	600	967	1314600	2118697

Sonlu Eleman modelinde temel-zemin ara bölgesinin modellenmesi için, betonarme temel ile zemin arasında nonlineer Gap elemanları yerleştirilmektedir ve bu şekilde üstyapı ile temelin bağlantısı gerçekleştirilmektedir. Gap bağlantı elemanının özellikleri Bölüm 6.1.4.3'te verilmektedir. Tanımlanan Gap elemanında bulunan 6 adet bağımsız serbestlik derecesinden sadece basınçta çalışan eksenel yöndeki serbestlik derecesi (k_z) aktif hale getirilmektedir (Şekil 7.5). Bu şekilde betonarme temelin sismik yükler etkisinde çekme bölgesinde zeminden bağımsız olarak yukarıya doğru hareket edebilmesi ve temelin dönebilmesi sağlanmaktadır.

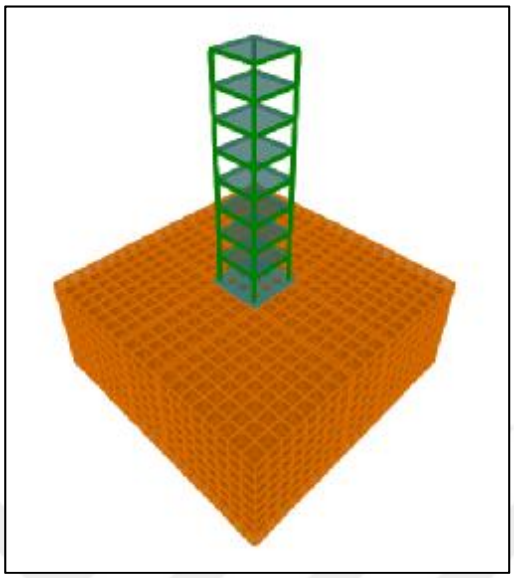


Şekil 7.5. Temel-zemin ara bölgesi için kullanılan Gap bağlantı elemanı

Gap elemanının basınçtaki eksenel rijitliği, zemin rijitliğine eşit olduğu varsayılmaktadır. Rijitlik hesabı için bağlantı noktasında zemine statik birim yük uygulanarak oluşan deplasman hesaplanmaktadır ve elastik yay için yük-deplasman ilişkisini kullanarak rijitlikler elde edilmektedir. Bu işlem sap2000 programında yapılmaktadır. Temelin oturduğu zemin üzerinde kaymaması varsayılmaktadır. Bu yüzden x yönünde rijitlik (k_x) tutulu olarak kabul edilmektedir.

Sonlu Eleman modelinde üstyapıda kolon, kiriş ve çapraz modellenmesi için Frame elemanı, betonarme döşemeler için Shell elemanı ve betonarme temel için Solid elemanı kullanılmaktadır. Elastomerik sismik izolatörler ise, nonlineer Link elemanı ile modellenmektedirler. Söz konusu elemanların özellikleri detaylı olarak Bölüm 6'da verilmiştir.

Yukarıda verilen detaylar ve modelleme yöntemine göre programda oluşturulan sayısal model Şekil 7.6'da gösterilmektedir.



Şekil 7.6. Sap2000 sonlu eleman modeli

Sonlu eleman modelinde, yakın bölge zemin için X ve Y yönlerinde 20 adet, Z yönünde ise, 8 adet Solid elemanı kullanılmaktdadır. Temel X ve Y yönlerinde 5 adet Solid elemanı ile, kat döşemeleri ise, her iki yönde 4 adet Shell elemanı ile modellenmektedir. Buna göre zemindeki Sonlu Eleman sayısı 3200 adet, temel Sonlu Eleman sayısı 25 adet ve döşeme Sonlu Eleman sayısı 16 adettir.

7.5. Analiz Yöntemi

Çalışmada yapı-zemin etkileşimi analizi için direk analiz yöntemi kullanılmaktadır. Direk analiz yönteminde Bölüm 4.3.1'de verildiği gibi üstyapı ve zemin birlikte modellenmektedirler. Analizler serbest titreşim analizi ve zaman tanım alanında zorlanmış titreşim analizi olmak üzere iki durum için gerçekleştirilmektedirler. Serbest titreşim analizinde, Özvektör modal analiz yönteminden yararlanarak değişik durumlar için yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodları elde edilmektedir. Zorlanmış titreşim analizi kısmında ise, yapısal modellerin sismik davranışı gerçek deprem ivme kayıtları etkisi altında

incelenmektedir. Zaman tanım alanında gerçekleştirilmekte olan zorlanmış titreşim analizinde, zeminin lineer elastik bir davranışa sahip olduğu, üstyapı davranışının ise, nonlineer olduğu kabul edilmektedir. Üstyapı nonlineer davranışı P-Δ ve büyük deformasyonlar etkisinde oluşmaktadır. Üç boyutlu olarak yapılmakta olan sismik analizler Hilber, Hughes ve Taylor α sayısal integrasyon yöntemi kullanılmaktadır.

7.6. Serbest Titreşim Analizi

Doğal serbest titreşim periyodu yapı sismik davranışında önemli bir etken olarak tanımlanmaktadır. Genelde yapı sistemlerinin doğal serbest titreşim periyodları, özvektör veya yüklemeye bağlı ritz vektörleri modal analiz yöntemleri yardımıyla elde edilmektedir. Bu çalışmada, incelenmekte olan yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodlarının belirlenmesi için özvektör modal analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Bu bölümde zemin özelliklerinin sismik taban izolasyonlu ve izolasyonsuz modellerin doğal serbest titreşim periyodları üzerindeki etkisi incelenmektedir. Ayrıca üstyapı dikkate alınmadan, yakın bölgede zemin için serbest titreşim analizi yapılarak, zeminin doğal serbest titreşim periyodları elde edilmektedir. Bu değerler teorik olarak hesaplanan doğal serbest titreşim periyod değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

7.6.1. Zemin Serbest Titreşim Analizi

Zemin doğal serbest titreşim periyodu teorik olarak Denklem 7.5'ten elde edilmektedir (Kumar, 2008). Denklem 7.5'te, H_s yakın bölge zeminin derinliğini, V_s ise, kayma dalgası hızını göstermektedir.

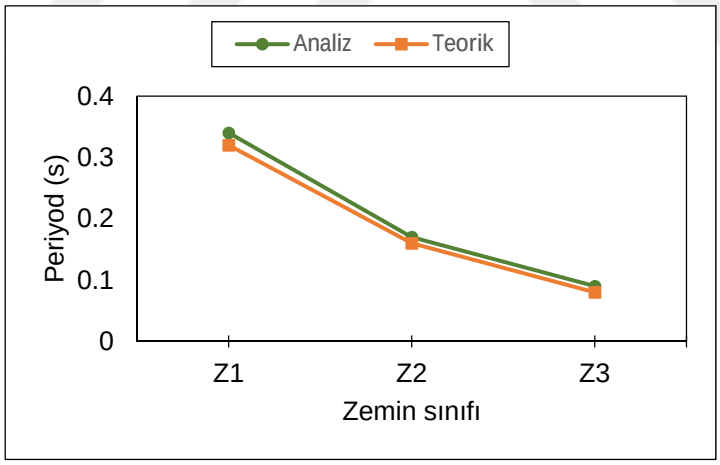
$$T_s = \frac{4H_s}{V_s} \tag{7.5}$$

Analizden elde edilen ve teorik olarak hesaplanan zemin doğal serbest titreşim periyodları Çizelge 7.9'da verilmektedir. Görüldüğü gibi analiz sonuçları ile teorik değerler oldukça yakındır. Bu durum sayısal modelin gerçek zemin şartlarına uyduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.9. Sap2000 analizinden ve teorik olarak elde edilen zemin doğal serbest titreşim periyodları

Zemin sınıfı	Kayma dalgası hızı (m/s^2)	Periyod (s)	
		Analiz	Teorik
Z1	150	0.34	0.32
Z2	300	0.17	0.16
Z3	600	0.09	0.08

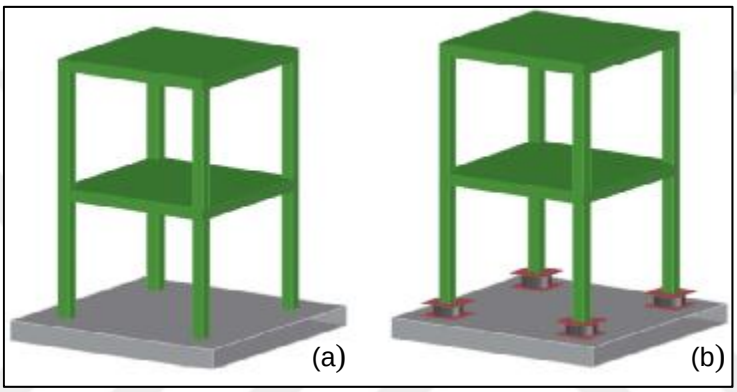
Sonuçlar grafiksel olarak Şekil 7.7'de gösterilmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi, zeminin sertliği arttıkça, doğal serbest titreşim periyodu azalmaktadır.



Şekil 7.7. Sap2000 analizinden ve teorik olarak elde edilen zemin doğal serbest titreşim periyodları

7.6.2. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınmadan Serbest Titreşim Analizi

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan yapısal modeller için modal analiz yapılarak doğal serbest titreşim periyodları elde edilmektedir. Analizler sismik taban izolatörü olmadan ve sismik izolatörler (BI2 ve BI3) kullanarak iki durumda gerçekleştirilmektedir (Şekil 7.8). Periyod değerleri Çizelge 7.10'da verilmektedir.



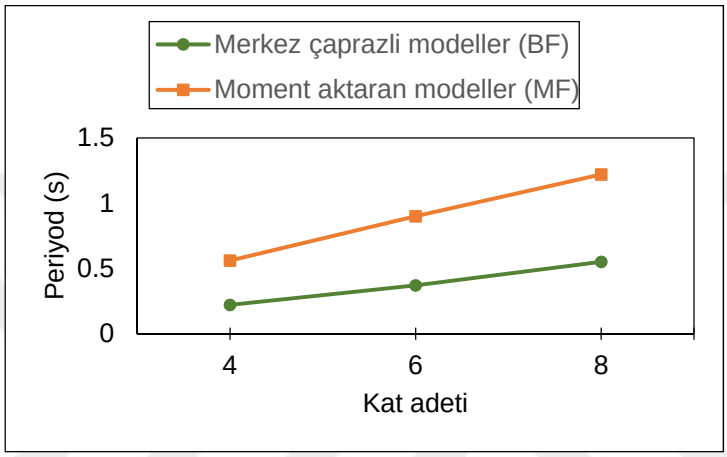
Şekil 7.8. Yapı-zemin etkileşimi olmadan; sismik izolatörsüz (a) ve sismik izolatörlü (b) modellerin şematik görünüşü

Çizelge 7.10. Yapı-zemin etkileşimi olmadan; sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu yapısal modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodları (s)

Model	İzolatör Yok	İzolatör Tipi	
		BI2	BI3
MF4	0.59	2.005	2.995
MF6	0.90	1.996	2.992
MF8	1.222	2.007	3.000
BF4	0.22	2.002	2.994
BF6	0.37	2.003	3.002
BF8	0.553	2.003	3.002

Elde edilen sonuçlar, merkezi çaprazlı modellerin moment aktaran modellere göre daha düşük periyod değerlerine sahip olduklarını göstermektedir. Her iki sistemde kat adeti arttıkça modellerin serbest titreşim periyodlarında artış

görünmektedir. Doğal serbest titreşim periyodunun kat adeti ve yapısal sisteme göre değişimi Şekil 7.9'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, merkezi çaprazlı ve moment aktaran modellerde kat adetine göre serbest titreşim periyodlar lineer olarak artmaktadır.

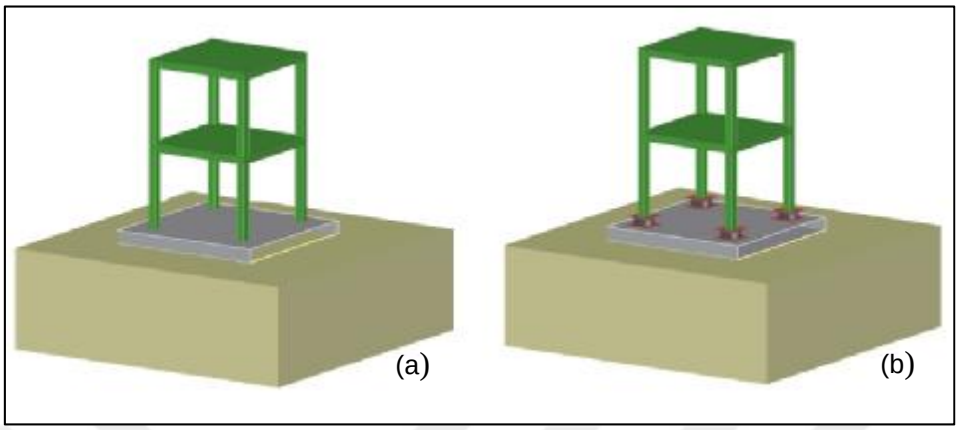


Şekil 7.9. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan yapısal modellerin kat adeti ve yük taşıma sistemine göre doğal serbest titreşim periyodlarının değişimi

Sismik taban izolasyonlu modeller için modal analizden elde edilen doğal serbest titreşim periyodları (Çizelge 7-10), Bölüm 7.3'te verilmiş olan periyod değerlerine (2s ve 3s) oldukça yakındır. Maksimum fark %0.35 olarak MF8 modelinde oluşmaktadır.

7.6.3. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Serbest Titreşim Analizi

İkinci aşamada yapı-zemin etkileşiminin etkisi dikkate alınarak yapısal modeller üzerinde serbest titreşim analizi gerçekleştirilmektedir ve zemin özelliklerinin yapı doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi araştırılmaktadır (Şekil 7.10). Yapı-zemin etkileşimi etkisi altında modal analizden elde edilen doğal serbest titreşim periyodları, moment aktaran modeller için Çizelge 7.11'de ve merkezi çaprazlı modeller için Çizelge 7.12'de verilmektedir.



Şekil 7.10. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; sismik izolatörsüz (a) ve sismik izolatörlü (b) modellerin şematik görünüşü

Çizelge 7.11 ve Çizelge 7.12'de verilen sonuçlar sismik taban izolatörü olmadan ve sismik taban izolatörü kullanarak iki durum için sunulmaktadır.

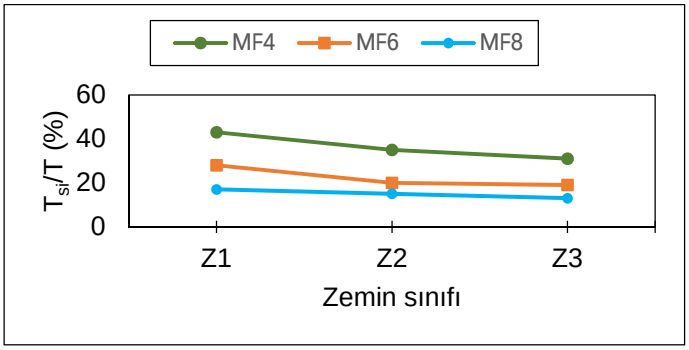
Çizelge 7.11. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu moment aktaran modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodu (s)

Yapısal model	Zemin sınıfı	Sismik taban izolasyonsuz	İzolatör tipi	
			BI2	BI3
MF4	Z1	0.843	2.019	3.004
	Z2	0.755	2.013	3.001
	Z3	0.690	2.011	3.000
MF6	Z1	1.215	2.073	3.043
	Z2	1.08	2.047	3.028
	Z3	1.036	2.041	3.023
MF8	Z1	1.598	2.126	3.080
	Z2	1.451	2.094	3.060
	Z3	1.354	2.087	3.055

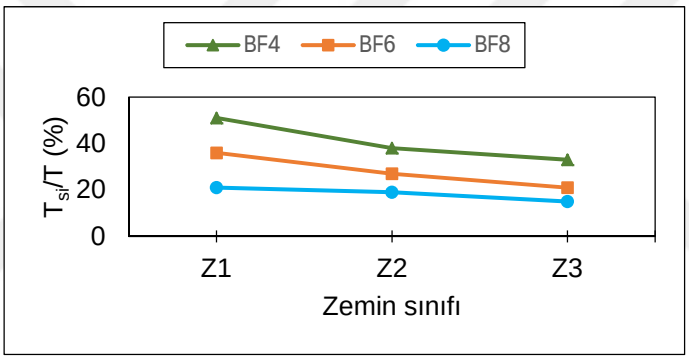
Çizelge 7.12. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ; sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu merkezi çaprazlı modeller için elde edilen doğal serbest titreşim periyodu (s)

Yapısal model	Zemin sınıfı	Sismik taban izolasyonsuz	İzolatör tipi	
			BI2	BI3
BF4	Z1	0.332	2.011	3.004
	Z2	0.299	2.005	3.002
	Z3	0.266	2.003	3.001
BF6	Z1	0.510	2.023	3.016
	Z2	0.469	2.008	3.006
	Z3	0.440	2.005	3.004
BF8	Z1	0.735	2.046	3.030
	Z2	0.669	2.015	3.010
	Z3	0.635	2.008	3.005

Yapı-zemin etkileşimi etkisindeki sismik taban izolasyonsuz ve izolasyonlu modellerin doğal serbest titreşim periyodunun rijit tabanlı modellerin doğal serbest titreşim periyoduna göre oranları Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de verilmektedir. Şekillerde T_{si}, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yapının doğal serbest titreşim periyodunu, T ise rijit tabanlı yapının doğal serbest titreşim periyodunu göstermektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, merkezi çaprazlı modellerin doğal serbest titreşim periyodu, moment aktaran modellerin periyoduna göre zemin özelliklerinden daha fazla etkilenmektedir. Ayrıca her iki yapı sisteminde, kat adeti arttıkça, zeminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi azalmaktadır. Bu durum üstyapı rijitliğinin yapı-zemin etkileşimi konusunda önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Zemin özellikleri ile ilgili olarak, yumuşak zeminlerde doğal serbest titreşim periyodu sert zeminlere göre daha fazla artış göstermektedir.



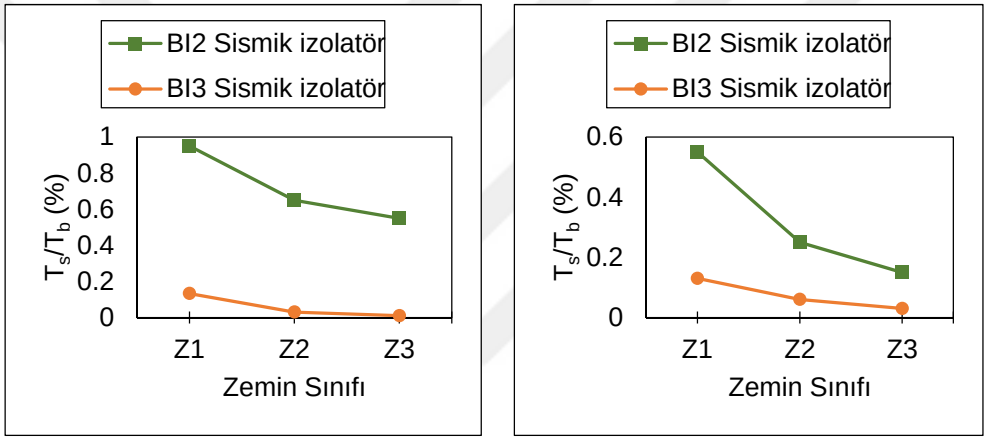
Şekil 7.11. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi



Şekil 7.12. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi

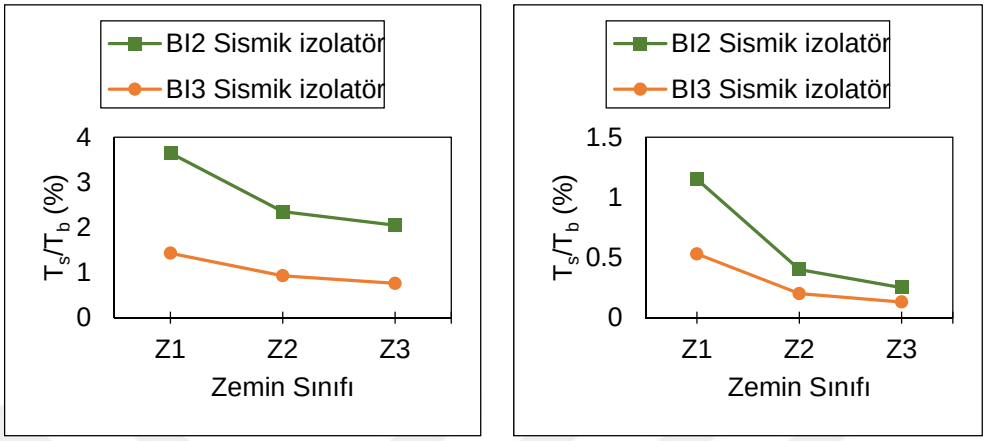
Konu ile ilgili daha önce yapılmış araştırmalar, zemin özelliklerinin yapı doğal serbest titreşim periyodu üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Tabatabaiefar ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada değişik zemin sınıfları dikkate alınarak, yapı-zemin etkileşimi etkisinde 30 m yüksekliğe sahip 10 katlı moment aktaran bir modelin serbest titreşim periyodları incelenmiştir. İlgili çalışmada Ee, De ve Ce olarak isimlendirilen ve sırayla 150 m/s, 320 m/s ve 600 m/s kayma dalgası hızına sahip üç tip zemin dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar doğal serbest titreşim periyodunun yapı-zemin etkileşimi etkisindeki artışının, Ee zemininde %73, De zemininde %38 ve Ce zemininde %5 olarak

göstermiştir.Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi ise, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak taban izolasyonlu modelin maksimum doğal serbest titreşim periyodunun (T_{si}), yapı-zemin etkileşimi olmadan taban izolasyonlu yapısal modelin doğal serbest titreşim periyoduna (T_b) göre oranı dikkate alınarak incelenmektedir. Bu oran, MF4 ve BF4 modelleri için Şekil 7.13'te, MF6 ve BF6 modelleri içn Şekil 7.14'te ve MF8 ve BF8 modelleri için Şekil 7.15'te verilen grafiklerde gösterilmektedir.



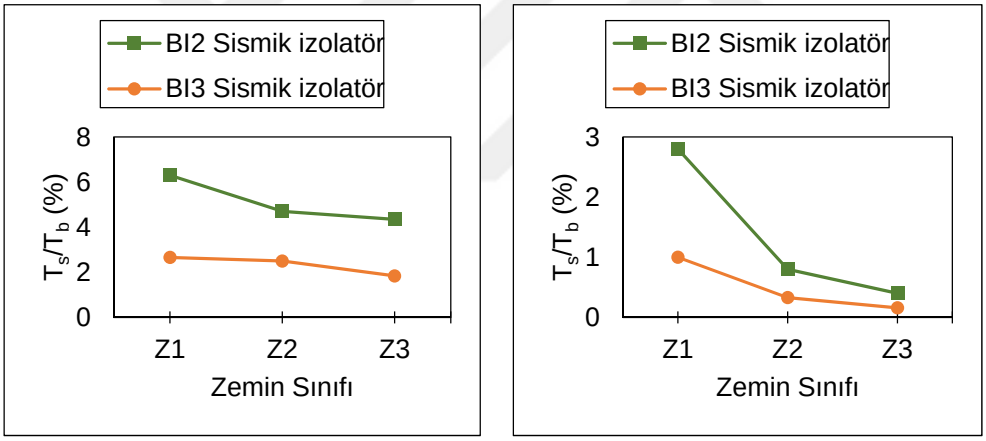
MF4 modeli BF4 modeli

Şekil 7.13. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF4 ve BF4 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi



MF6 modeli BF6 modeli

Şekil 7.14. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF6 ve BF6 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi



MF8 modeli BF8 modeli

Şekil 7.15. Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu MF8 ve BF8 modellerinin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi

Şekillerden görüldüğü gibi, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu modellerin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Maksimum artış %6.3 olarak MF8 modelinde elde edilmektedir. Sonuçlar, sismik izolasyon sisteminin rijitliği arttıkça, yapı-zemin etkileşiminin

doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Araştırmacılar tarafından, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisine yönelik yapılan çalışmalarda, doğal serbest titreşim periyodunun zemin şartları ve yapı özelliklerine göre değişimi konusu dikkate alınmıştır. Hatami ve ark. (2015) konu ile ilgi yaptıkları bir teorik çalışmada, iki boyutlu bir yapı modelinin, değişik zemin özelliklerini dikkate alarak, doğal serbest titreşim periyodları elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu modellerin doğal serbest titreşim periyodlarının arttırdığını ve bu etkinin yumuşak zeminlerde ve yüksek yapı modellerinde daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu değişimin 10 katlı ve 70 m/s kayma dalgası hızına sahip yumuşak bir zemine oturan bir yapı modelinde 26% olarak elde edilmiştir. Aynı modelde daha düşük rijitliğe sahip sismik izolatör kullanarak oranın 12% olduğu tespit edilmiştir. Haiang ve ark. (2014) tarafından, yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu yapılar üzerindeki etkisine yönelik yapılan deneysel çalışmada, zemin etkileri dikkate alınarak, incelenen yapısal modelin doğal serbest titreşim frekansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yapı-zemin etkileşimi etkisinde taban izolasyonlu modelin doğal serbest titreşim frekansının azaldığını (veya periyodun arttığını) göstermiştir.

7.7. Zaman Tanım Alanında Zorlanmış Titreşim Analizi

Yapısal modellerin sismik davranışı zaman tanım alanında nonlineer analiz yapılarak elde edilmektedir. Analizlerde zemin davranışının lineer olduğu, ancak üstyapının nonlineer davranışa sahip olduğu varsayılmaktadır. Üstyapıdaki nonlineer davranış P-Δ ve büyük deformasyonlar etkisinde oluşmaktadır. Zaman tanım alanında nonlineer analizler sayısal integrasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Sayısal integrasyon için Hilber, Hughes ve Taylor α yöntemi kullanılmaktadır. Analizlerde sönüm modeli için rijitlik ve kütle orantılı Rayleigh Sönüm modeli kullanılmaktadır.

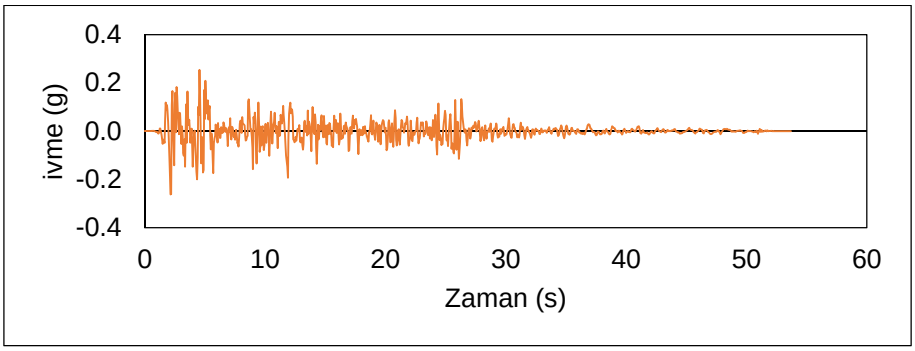
7.7.1. Sismik Analizde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları

Zaman tanım alanında gerçekleştirilmekte olan sismik analizlerde gerçek deprem ivme kayırları kullanılmaktadır. Analizlerde kullanılan Imperial Valley (1940) depremi El Centro istasyonu ve Kobe (1995) depremi Japon Meteoroloji istasyonuna (JMİ) ait özellikler Çizelge 7.13'te verilmektedir.

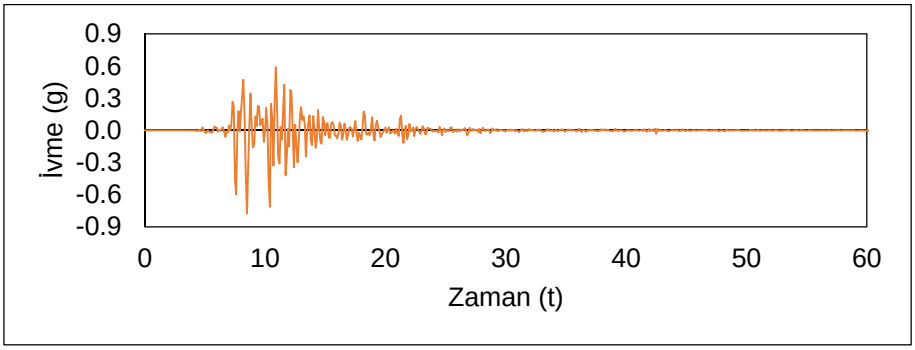
Çizelge 7.13. Sismik analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları

Deprem	İstasyon	M_e	D_e (km)	Bileşen	PGA(g)
Imperial Valley (1940)	El Centro	6.95	6.09	N180E	0.28
Kobe (1995)	JMİ	6.90	0.94	N00E	0.83

Çizelgede 7.13'te, M depremin büyüklüğünü, D istasyonun mesafesini ve PGA maksimum yer ivmesini göstermektedir. Çalışmada Imperial Valley depremi N180E bileşeni için ELC ve Kobe depremi N00E bileşeni için KOB isimleri kullanılmaktadır. İImperial Valley (1940) depremi ivme kaydının grafikleri Şekil 7.16'da, Kobe (1995) depremi ivme kaydının grafiği ise, Şekil 7.17'de verilmektedir.



Şekil 7.16. ELC depremi El Centro istasyonu N180E ivme bileşeni



Şekil 7.17. KOB depremi Japon meteoroloji istasyonu N00E ivme bileşeni

Herhangi bir yapının sismik tepkisi büyük ölçüde, yapının doğal serbest titreşim frekansı ile yer hareketi frekansı arasındaki orana bağlıdır. Bu yüzden sismik analizlerde yer hareketinin frekans içeriğini bilmek son derece önemlidir (Datta, 2010). Frekans içeriği bilgilerini elde etmek için en kolay ve pratik yöntem zaman tanım alanında ifade edilen yer hareketinin Fourier dönüşümü kullanarak frekans alanında ifade edilebilmesidir. Zaman tanım alanında elde edilmiş olan herhangi bir zemin hareketi Denklem 7.6'da verildiği gibi Fourier serisini kullanarak sonsuz sayıda harmonik fonksiyonun toplamı olarak ifade edilebilir.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\alpha} a_n \cos\omega_n t + b_n \sin\omega_n t \qquad (7.6)$$

Denklemde $x(t)$ zaman tanım alanında yer hareketinin deplasman, hız veya ivmesini, ω_n ise n. frekansı, a_n ve b_n sin ve cos fonksiyonlarının genliklerini göstermektedir. a_0, a_n ve b_n genlikleri Denklem 7.7, Denklem 7.8 ve Denklem 7.9'dan elde edilmektedirler. Denklemlerde T yer hareketinin süresini göstermektedir.

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)\mathrm{d}t \tag{7.7}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)\cos\omega_n \mathrm{d}t \tag{7.8}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)\sin\omega_n \mathrm{d}t \tag{7.9}$$

Yer hareketinin n. frekansı ise Denklem 7.10'dan elde edilmektedir.

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T} \tag{7.10}$$

Fourier genliği, harmonik hareketin ω_n frekansı için genliğini gösterir ve Denklem 7.11'den elde edilmektedir.

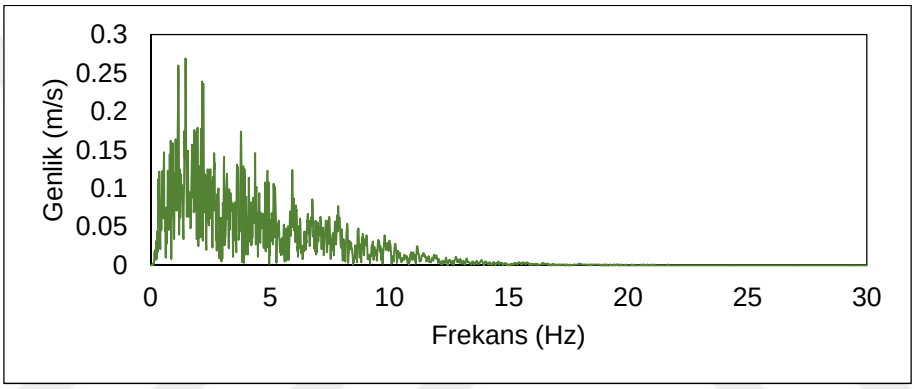
$$A_n^2 = \left[\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)\cos\omega_n t\mathrm{d}t\right]^2 + \left[\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)\sin\omega_n t\mathrm{d}t\right]^2 \tag{7.11}$$

Denklem 7.11, Denklem 7.12'de verildiği gibi ifade edilebilir. Denklem 7.12'de, c_n, A_n ile aynıdır. Eğer $c_0 = a_n$. ϕ_n ise, Denklem 7.13'ten elde edilmektedir.

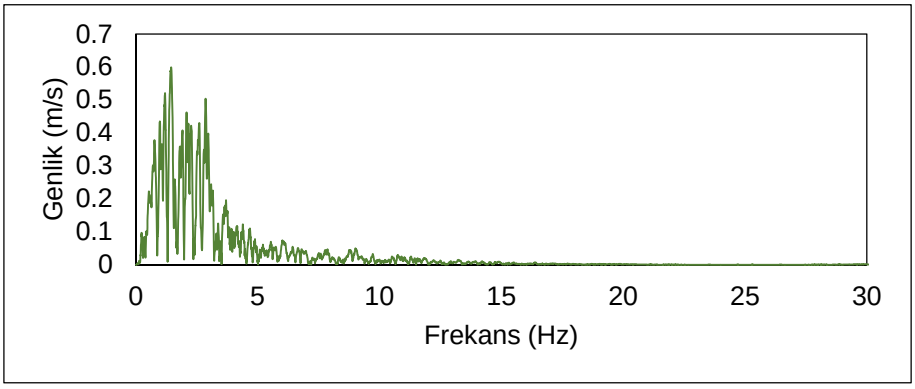
$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\alpha} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \tag{7.12}$$

$$\phi_n = tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \tag{7.13}$$

Fourier spektrumu, c_n'in ω_n'ye göre değişimi gösteren grafik olarak tanımlanmaktadır. Fourier spektrumu dar veya geniş olabilir. Dar spektrum, zemin hareketinde belli bir frekansın baskınlığını ve akıcı ve sinüzoidal bir hareketi göstermektedir. Geniş spektrum, çok düzensiz ve çeşitli frekansları içeren bir harekete karşılık gelir. Çalışmada kullanılan deprem ivme kayıtlarının Fourier spektrumu Imperial Vallay depremi için Şekil 7.18'de, Kobe depremi için ise, Şekil 7.19'da verilmektedir.



Şekil 7.18. ELC depremi Fourier spektrumu grafiği



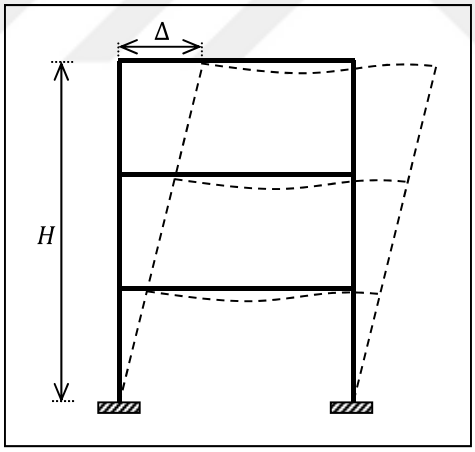
Şekil 7.19. KOB depremi Fourier spektrumu grafiği

7.7.2. Deprem Hareketi Etkisinde Yapısal Modellerin Sismik Davranışı

Bölüm 7.7.1'de verilen deprem ivme kayıtları etkisi altında, zaman tanım alanında nonlineer dinamik analizlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre değişik sismik davranış parametreleri incelenerek, farklı durumlar için söz konusu parametreler kıyaslanmakta olup, modellerin sismik davranışı değerlendirilmektedir. Sismik davranış parametreleri olarak, rölatif deplasman, taban kesme kuvveti ve sismik izolatör performansı dikkate alınmaktadır.

7.7.2.1. Rölatif Deplasman

Rölatif deplasman, Şekil 7.20'de gösterildiği gibi yapı uç noktasının tabana göre oluşan deplasmanı olarak tanımlanmaktadır. Sismik taban izolasyonlu modellerde rölatif deplasman, yapı ile sismik izolasyon sisteminin bağlantı noktasına göre hesaplanmaktadır.



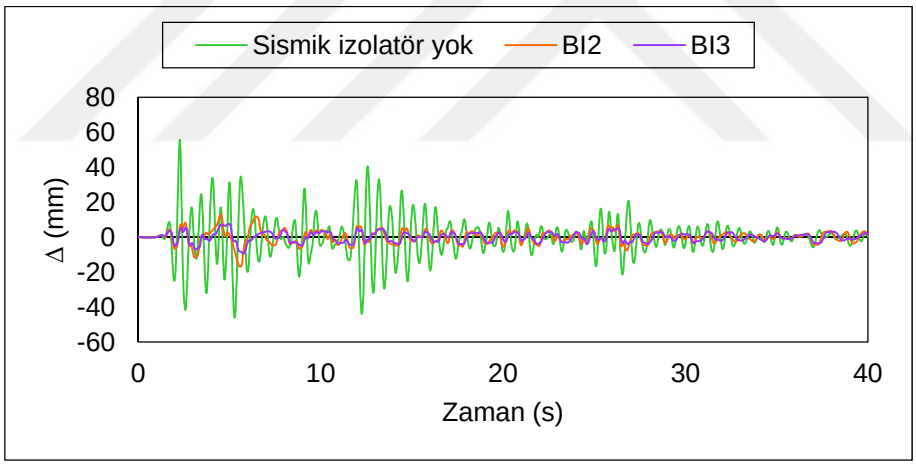
Şekil 7.20. Rölatif deplasman (Δ)

Yapı-zemin etkileşimi etkisinde ve yapı-zemin etkileşimi olmadan, sismik taban izolasyonlu ve izolasyonsuz modellerde oluşan rölatif deplasmanlar elde edilmekte olup, sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

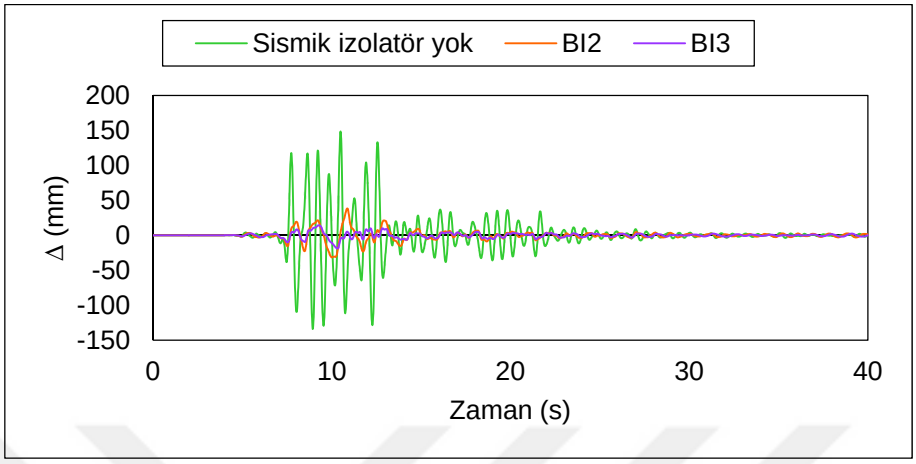
a) Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınmadan Yapısal Modellerde Oluşan Rölatif Deplasman

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan, sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz yapısal modellerde oluşan rölatif deplasman, bu bölümde incelenmektedir. Sonuçlar zaman tanım alanında elde edilerek, her bir yapısal model için ayrı ayrı grafikler oluşturulmaktadır. Ayrıca maksimum rölatif deplasman değeri elde edilerek; yapısal sistem, kat adeti, sismik izolatör özellikleri ve deprem özellikleri gibi parametrelerin, rölatif deplasman üzerindeki etkileri incelenmektedir.

ELC ve KOB depremleri etkisi altında MF4 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.21 ve Şekil 7.22'de verilmektedir.

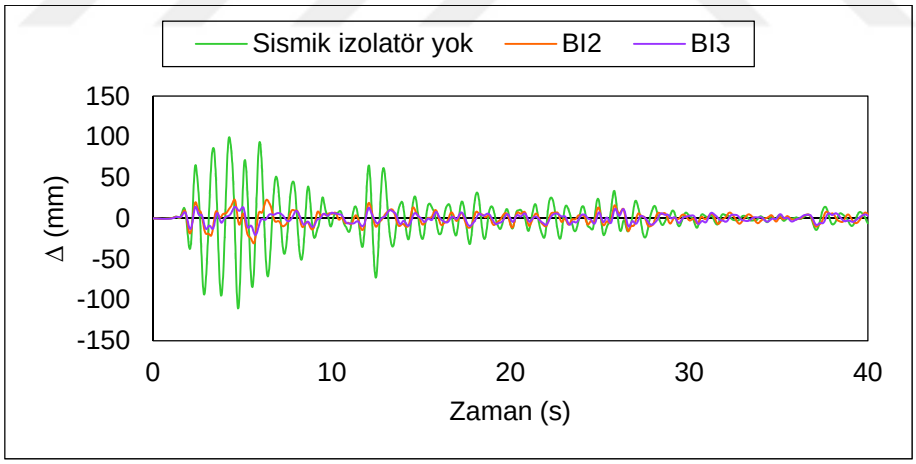


Şekil 7.21. ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

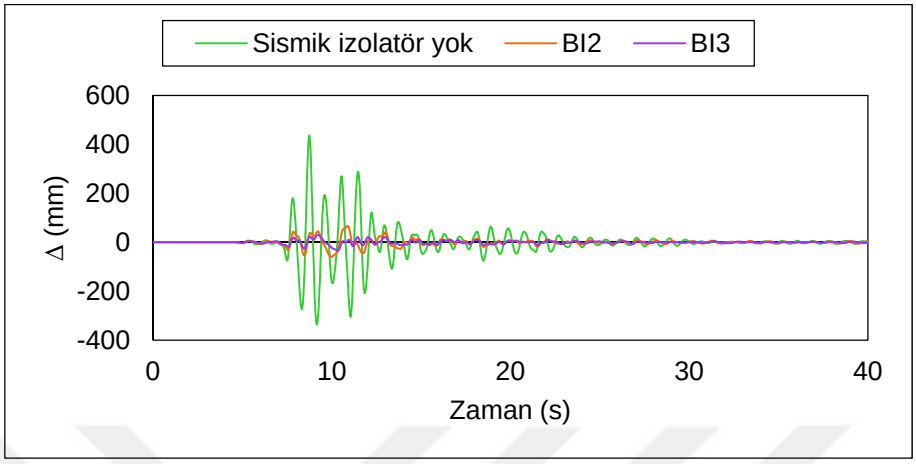


Şekil 7.22. KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

ELC ve KOB depremleri etkisi altında MF6 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'te verilmektedir.

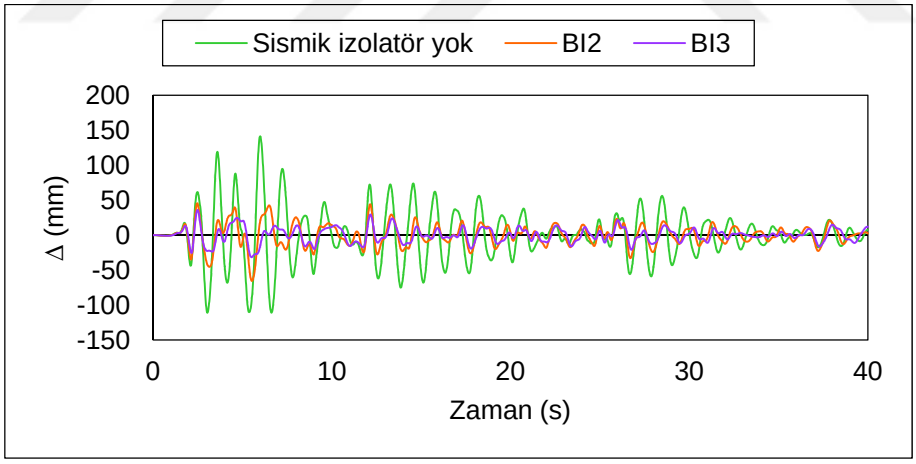


Şekil 7.23. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

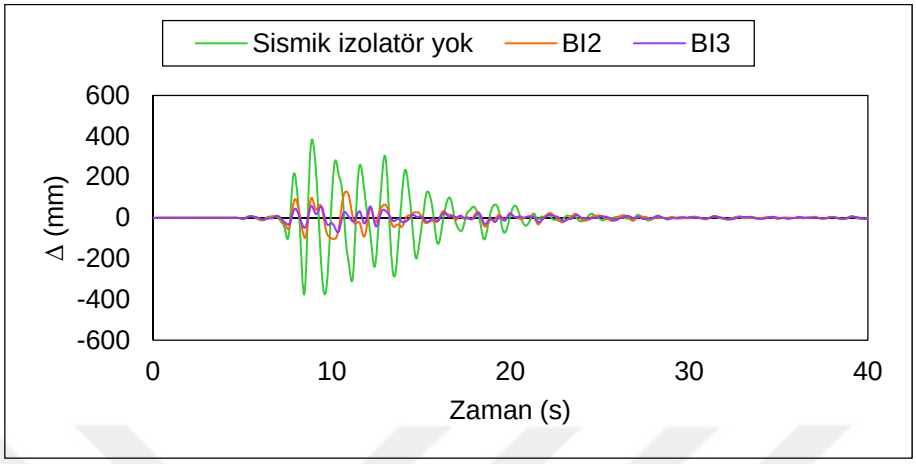


Şekil 7.24. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

ELC ve KOB depremleri etkisi altında MF8 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da, verilmektedir.

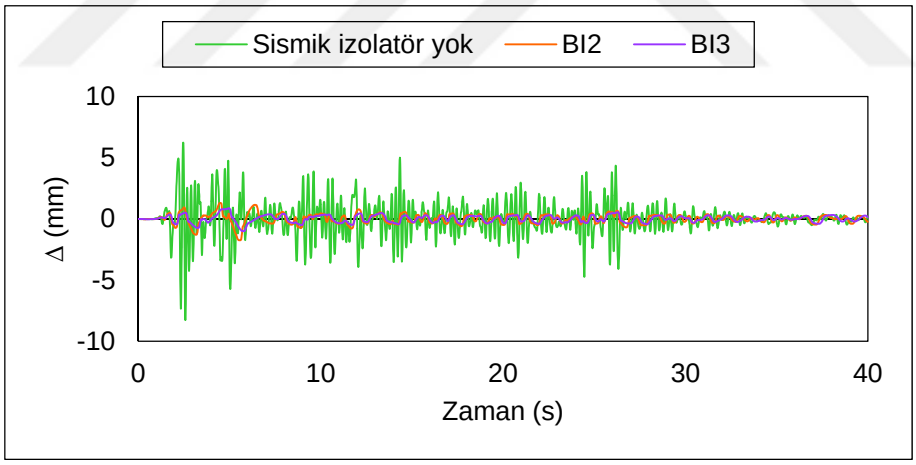


Şekil 7.25. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

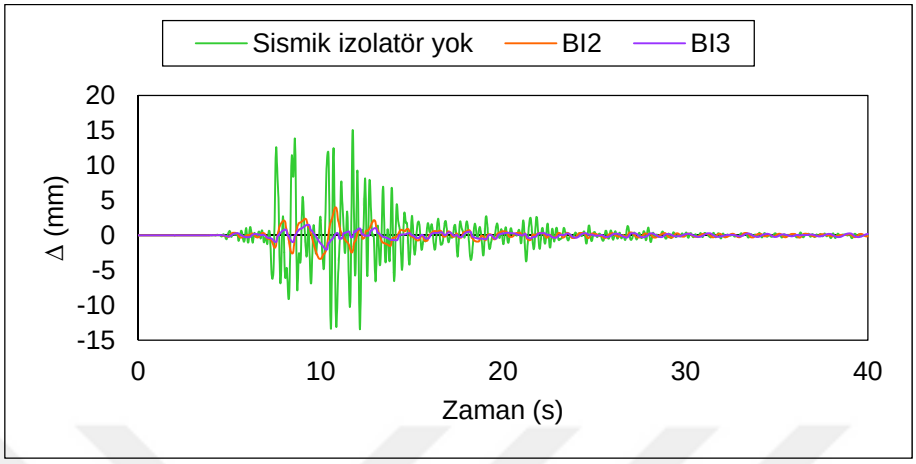


Şekil 7.26. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

ELC ve KOB depremleri etkisi altında BF4 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'de, verilmektedir.

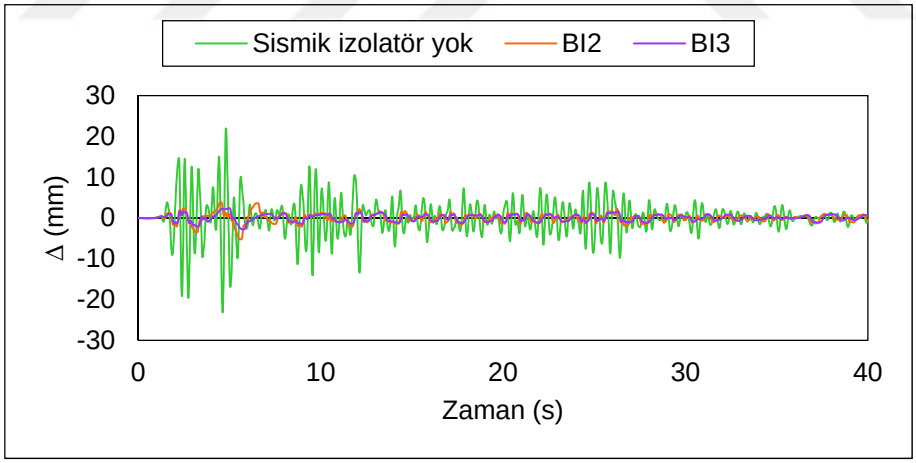


Şekil 7.27. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

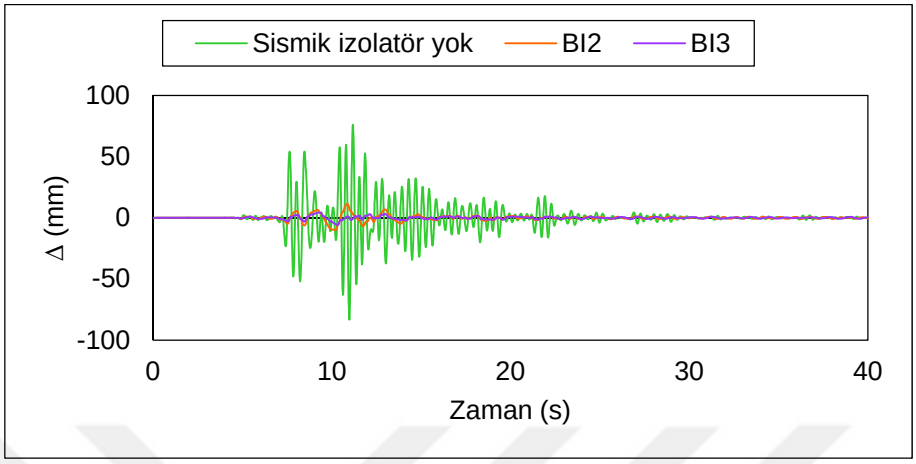


Şekil 7.28. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

ELC ve KOB depremleri etkisi altında BF6 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da verilmektedir.

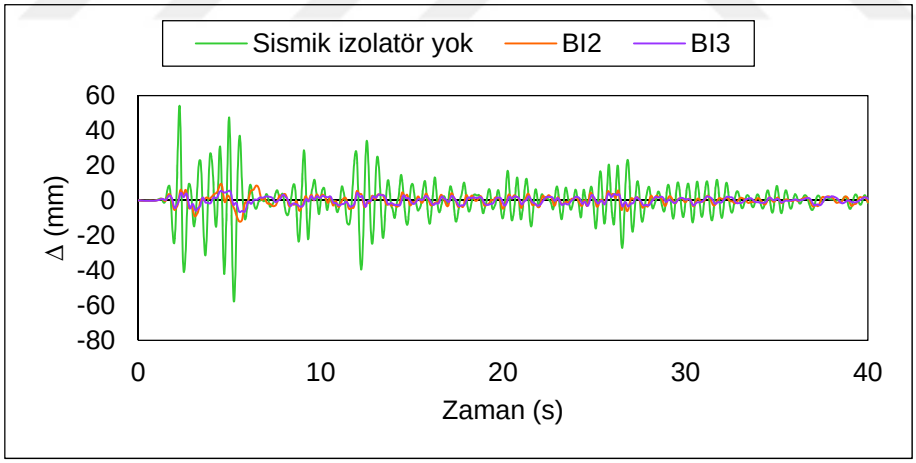


Şekil 7.29. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

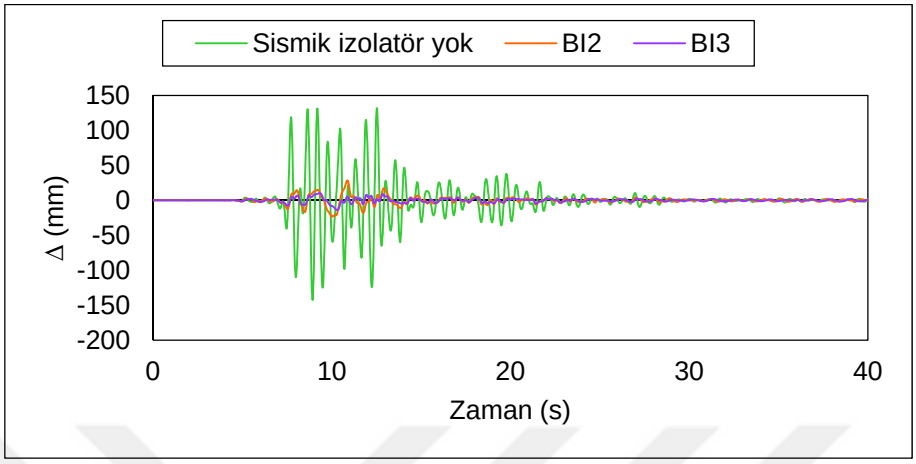


Şekil 7.30. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

ELC ve KOB depremleri etkisi altında BF8 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, Şekil 7.31 ve Şekil 7.31'de verilmektedir.



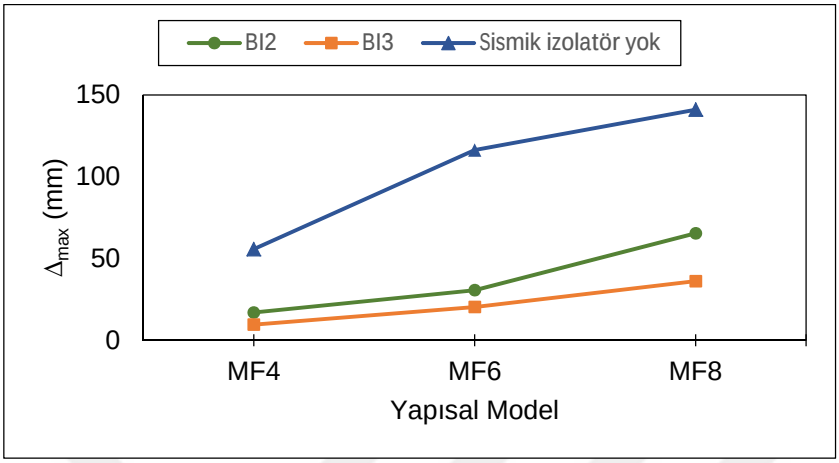
Şekil 7.31. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri



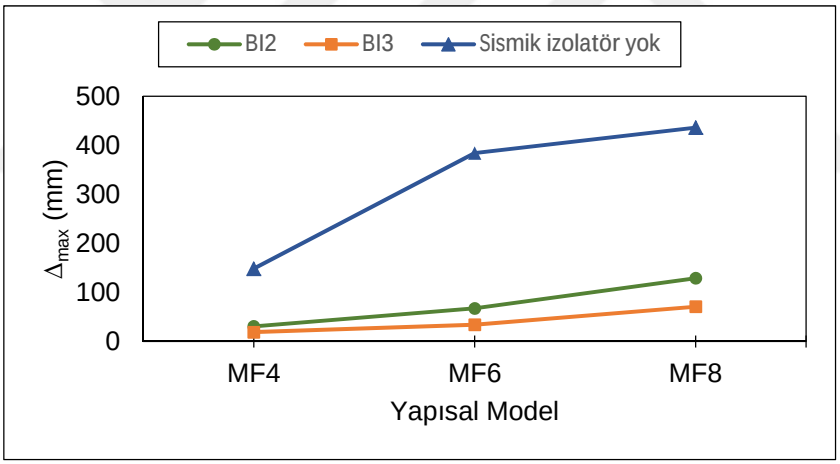
Şekil 7.32. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi

Şekillerde verilen grafiklerde görüldüğü gibi, sismik taban izolatörlü modellerde oluşan rölatif deplasman, sismik taban izolatörü olmayan durumlara göre oldukça düşüktür. Bu durumlar, sismik izolasyonun yapı rölatif deplasmanını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca sismik izolatör özelliklerinin de, yapıda oluşan rölatif deplasmanı etkileyebileceği grafiklerden görülmektedir. BI2 izolatörünü kullanarak yapılmış çözümlerde; yapısal modellerde oluşan rölatif deplasman, BI3 ile izole edilmiş yapılarda oluşan rölatif deplasmandan daha büyüktür. Bu sonuç, sismik izolatörün rijitliği ile üstyapıda oluşan rölatif deplasmanın orantılı olduğunu göstermektedir.

Yapısal sistem, kat adeti ve izolatör rijitliği parametrelerinin yapısal modelde oluşan rölatif deplasman üzerindeki etkisini incelemek için, modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanlar karşılaştırılmaktadır. Moment aktaran (MF) modellerin ELC ve KOB depremlerindeki maksimum rölatif deplasmanları Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'te verilmektedir.

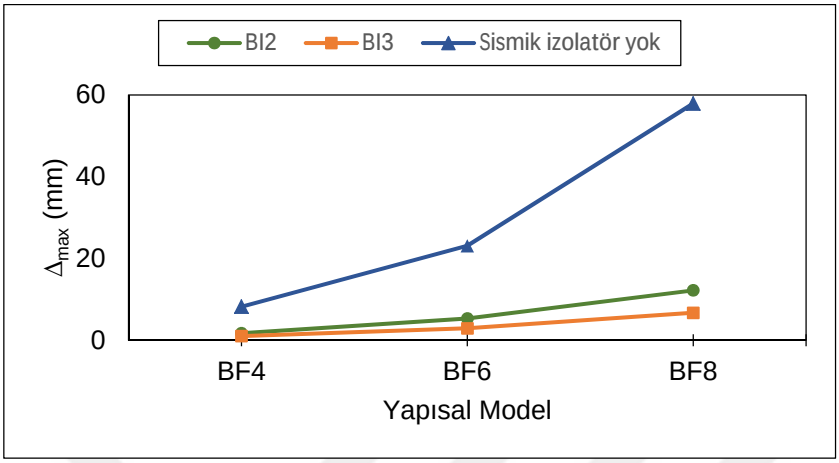


Şekil 7.33. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu moment aktaran modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

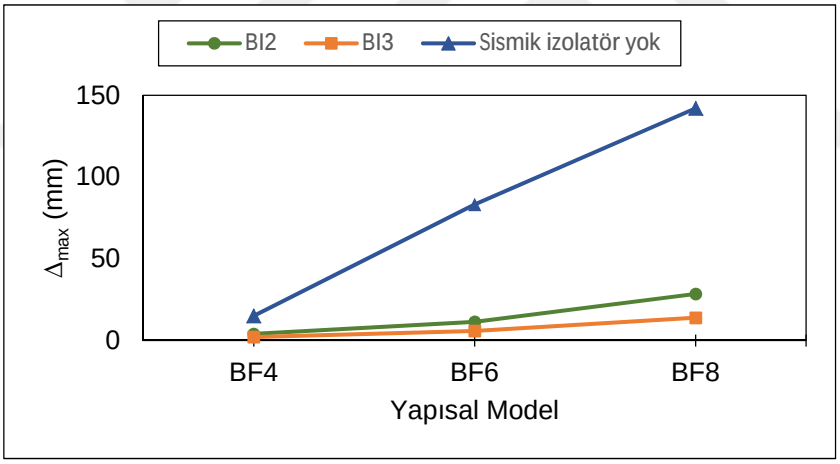


Şekil 7.34. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu moment aktaran modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

Merkezi çaprazlı (BF) modellerin ELC ve KOB depremlerindeki maksimum rölatif deplasmanları Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'da verilmektedir.



Şekil 7.35. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın



Şekil 7.36. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonlu merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

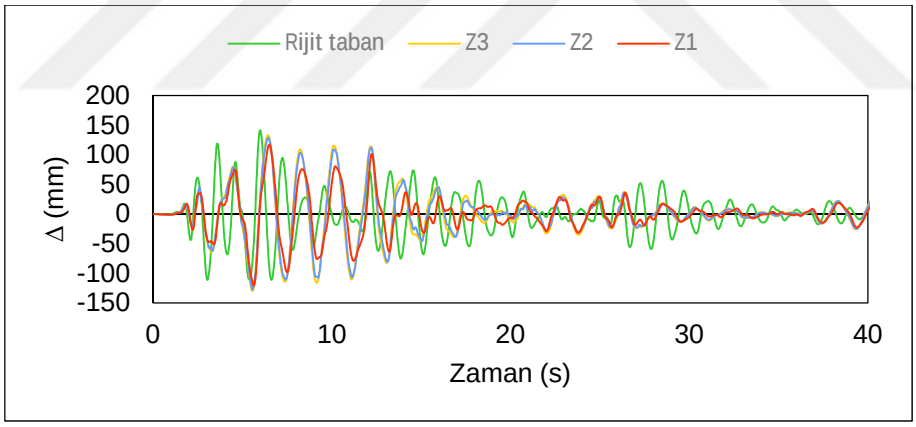
Merkezi çaprazlı (BF) sistemlerin rölatif deplasmanındaki azalma oranının, moment aktaran (MF) modeller göre daha yüksek olduğu şekillerden anlaşılmaktadır. Ayrıca kat adeti arttıkça rölatif deplasman azalma oranında artış

gözükmektedir. Maksimum azalma oranı %90.2 olarak BF8 modeli için elde edilmektedir. Bu oran aynı kat adetine sahip moment aktaran model (MF8) için %83.3 olarak hesaplanmaktadır.

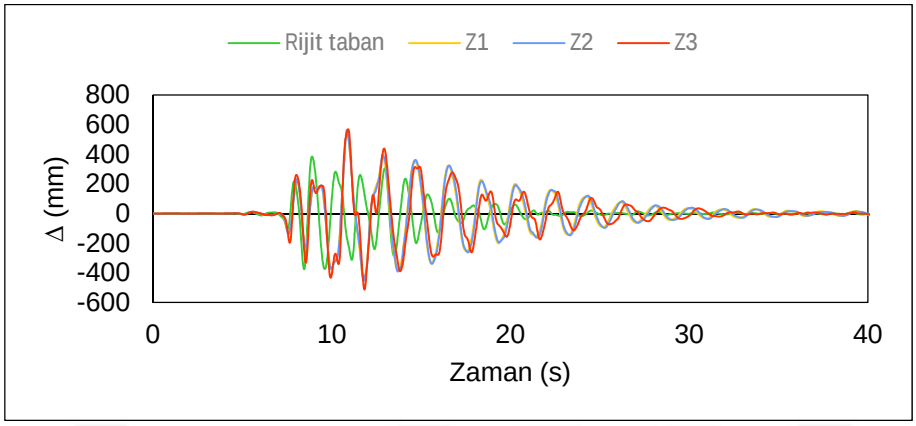
b) Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapısal Modellerde Oluşan Rölatif Deplasman

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak, sismik izolatörsüz modellerde, ELC ve KOB depremleri etkisinde oluşan rölatif deplasmanlar bu bölümde incelenmektedir. Verilen grafiklerde, zemin özelliklerinin rölatif deplasman üzerindeki etkisi incelenmektedir.

Moment aktaran MF8 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.37'de, KOB depremi için Şekil 7.38'de verilmektedir.

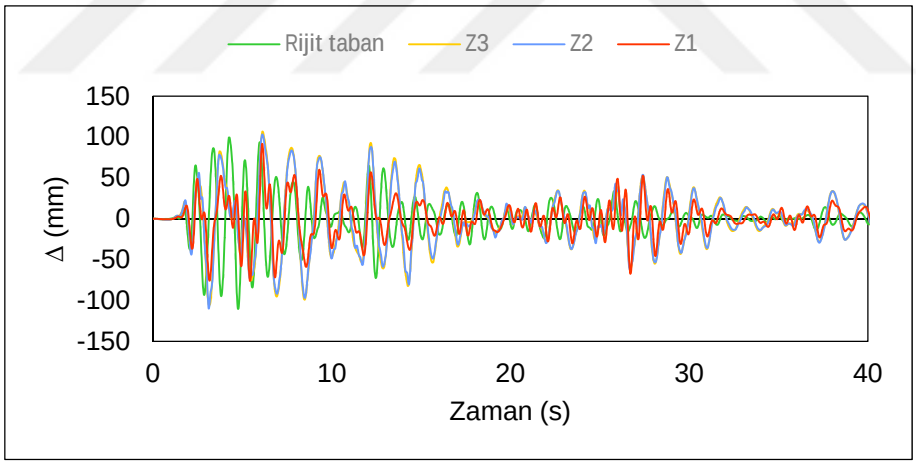


Şekil 7.37. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

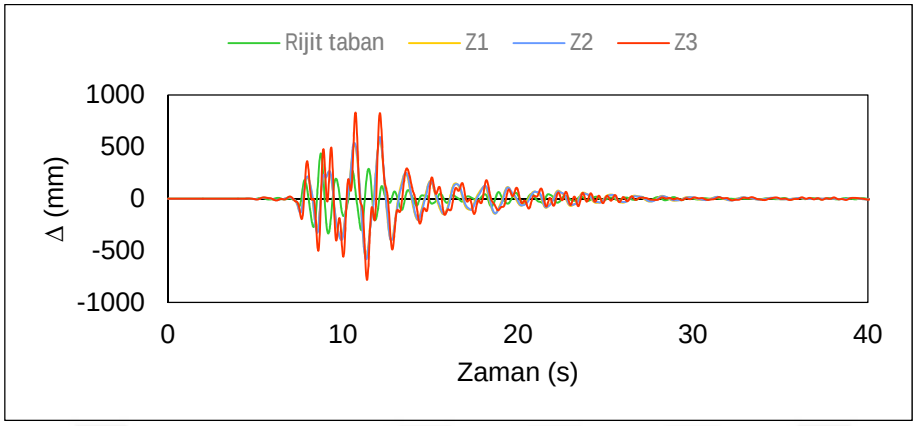


Şekil 7.38. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında MF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

MF6 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.39'da, KOB depremi için Şekil 7.40'ta verilmektedir.

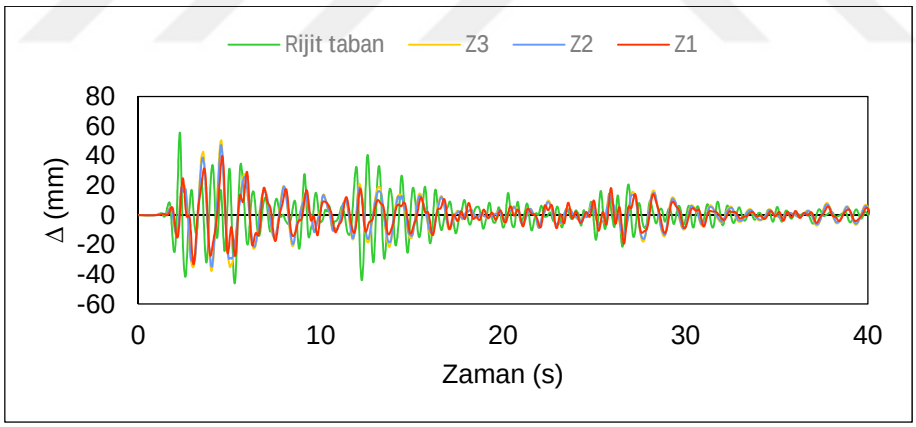


Şekil 7.39. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

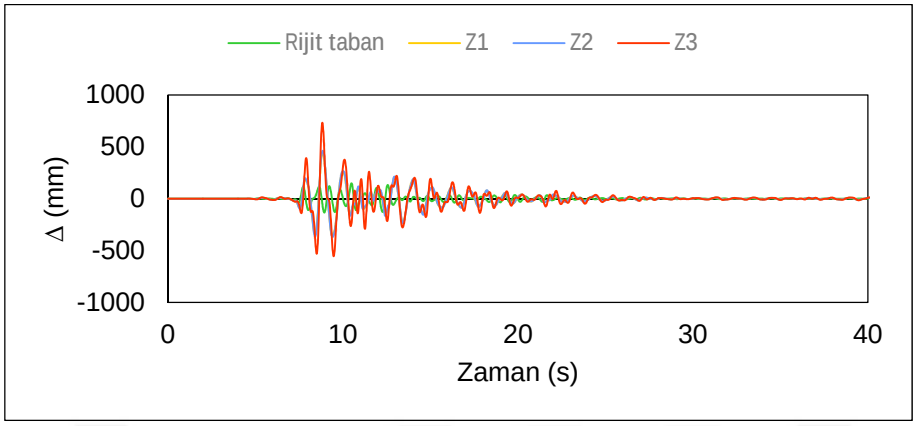


Şekil 7.40. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında MF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

MF4 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.41'de, KOB depremi için Şekil 7.42'de verilmektedir.

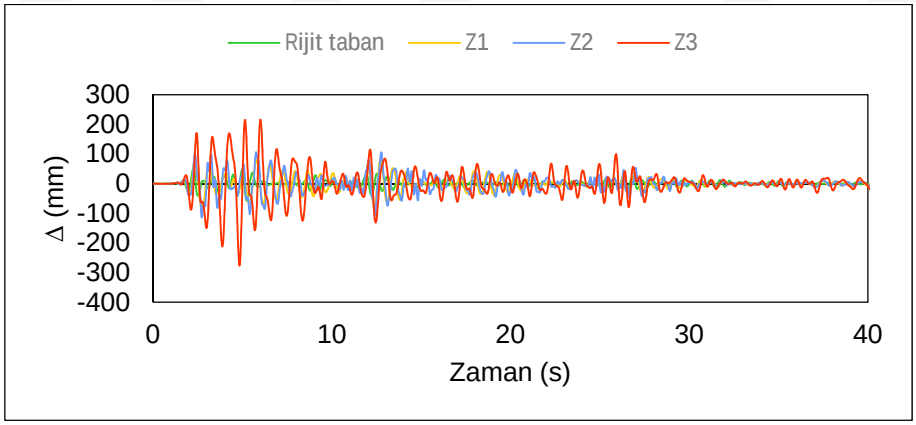


Şekil 7.41. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

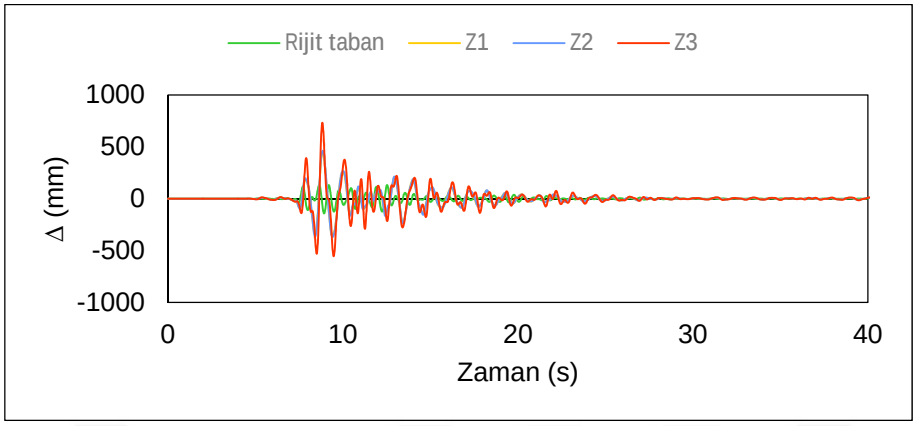


Şekil 7.42. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında MF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

Merkezi çaprazlı BF8 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.43'te, KOB depremi için Şekil 7.44'te verilmektedir.

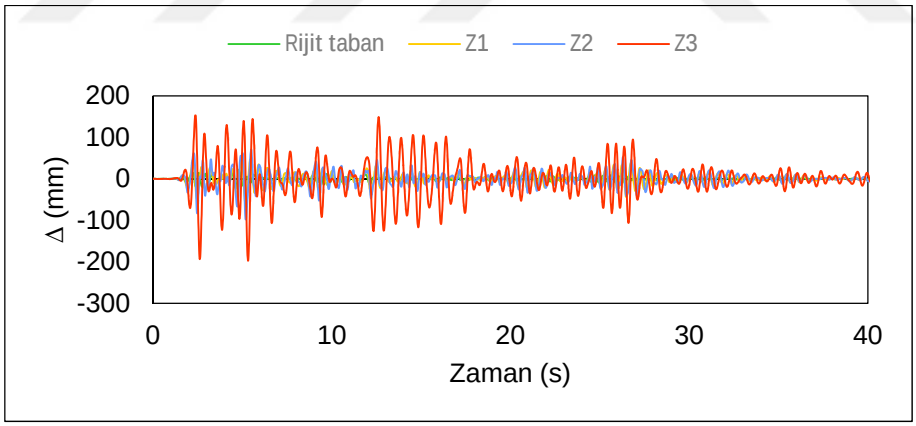


Şekil 7.43. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

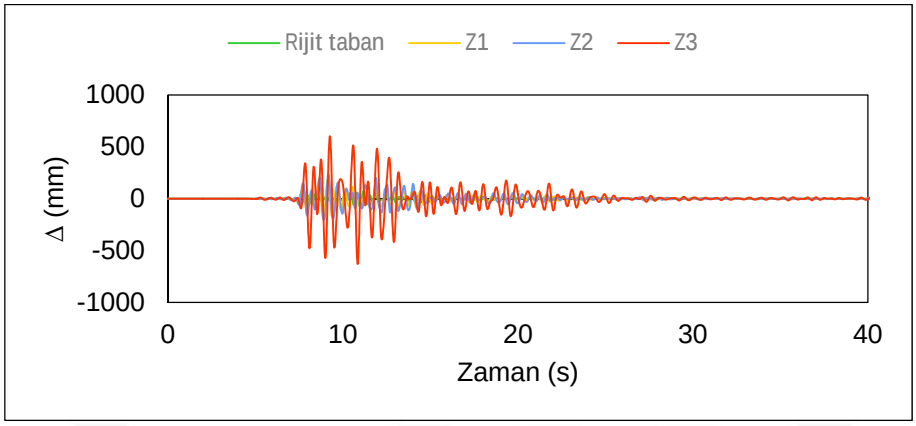


Şekil 7.44. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında BF8 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

BF6 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.45'te, KOB depremi için Şekil 7.46'da verilmektedir.

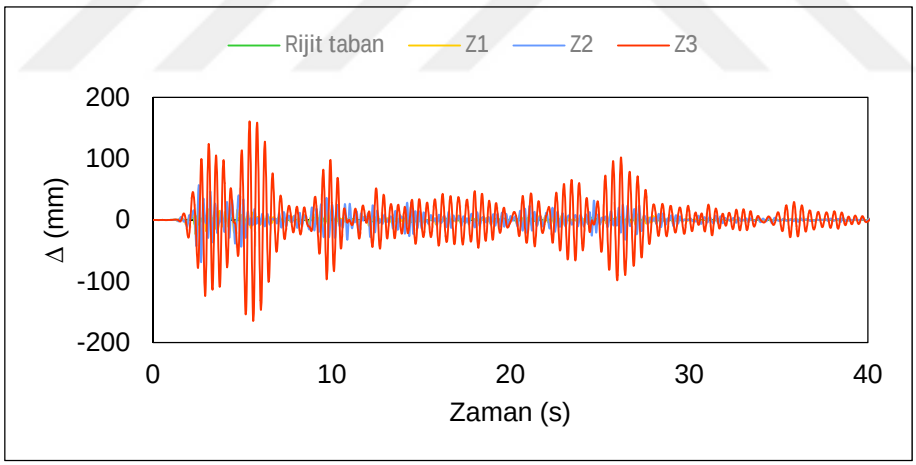


Şekil 7.45. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri

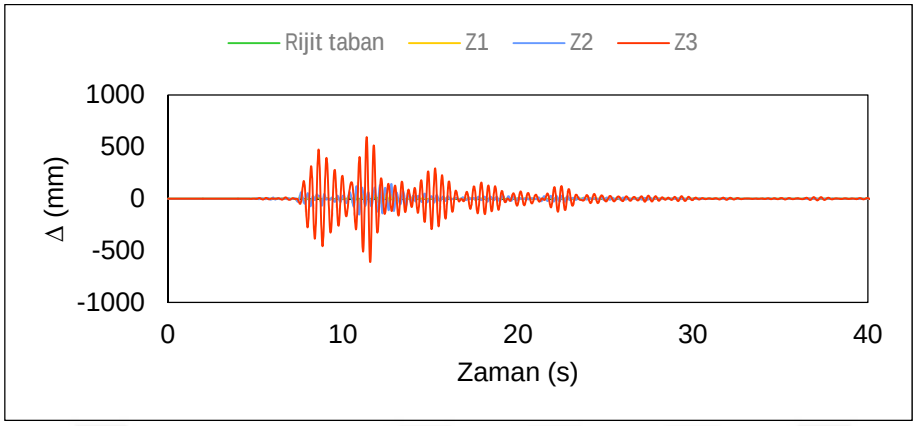


Şekil 7.46. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında BF6 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi

BF4 modeli için elde edilen rölatif deplasmanların zaman ile değişimleri, ELC depremi için Şekil 7.47'de, KOB depremi için Şekil 7.48'de verilmektedir.

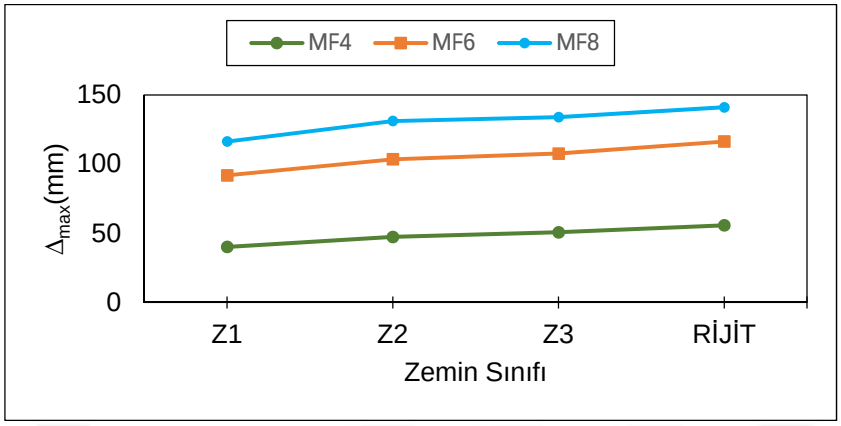


Şekil 7.47. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi

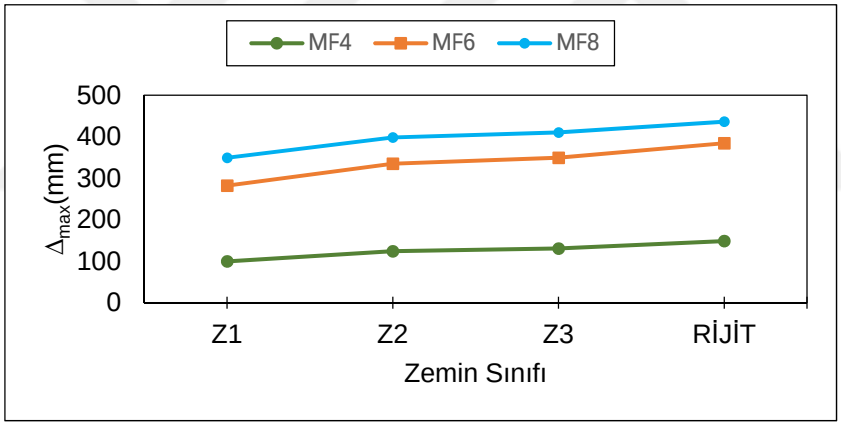


Şekil 7.48. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında BF4 modelinin uç noktasında oluşan rölatif deplasmanın zaman ile değişimi

Yapısal modellerde oluşan rölatif deplasmanın, yapı-zemin etkileşimi etkisinde azaldığı yukarıdaki şekillerden anlaşılmaktadır. Yumuşak zeminlerde bu etki, sert zeminlere göre daha fazladır. Zemin özelliklerinin yapıda oluşan rölatif deplasmana etkisini değerlendirilmek için, tüm modellere ait maksimum rölatif deplasman elde edilerek karşılaştırılmaktadırlar. Moment aktaran (MF) modellerin maksimum rölatif deplasmanı, ELC depremi için Şekil 7.49'da, KOB depremi için ise Şekil 7.50'de verilmektedir. Sonuçlar, zemin rijitliği azaldıkça rölatif deplasmanın azaldığını göstermektedir. Bu etki, az katlı yapı modellerinde daha fazladır. Azalma oranı, MF8, MF6 ve MF4 modellerinde olmak üzere ayrı ayrı elde edilmektedir.



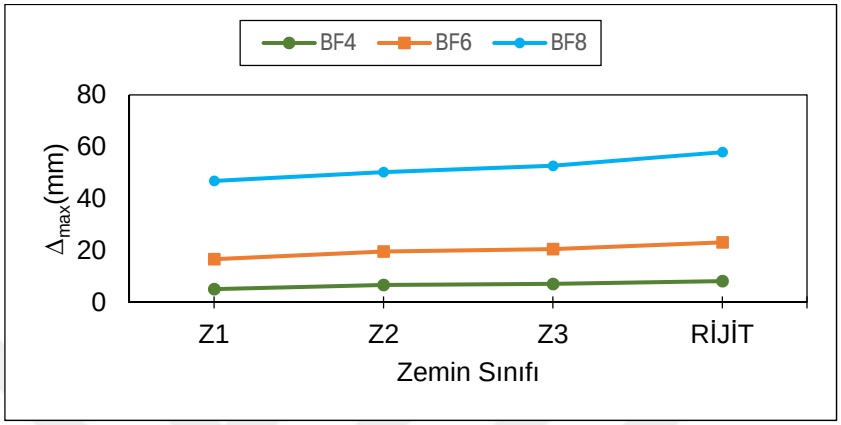
Şekil 7.49. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz moment aktaran modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın



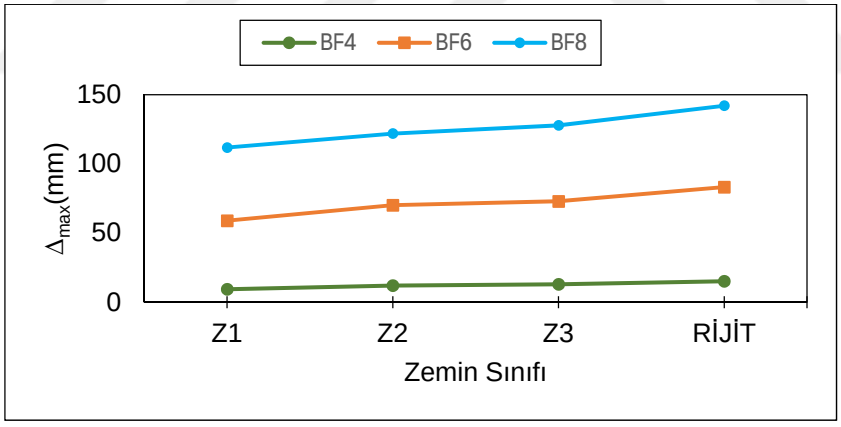
Şekil 7.50. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz moment aktaran modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

Merkezi çaprazlı (BF) modellerin maksimum rölatif deplasmanı, ELC depremi için Şekil 7.51'de, KOB depremi için ise Şekil 7.52'de verilmektedir. Moment aktaran modellerdeki gibi, çaprazlı modellerde de zemin rijitliği azaldıkça rölatif deplasmanın azalmaktadır. Ancak azalma oranı merkezi çaprazlı modellerde

moment aktaran modellere göre daha fazladır. Azalma oranı BF4, BF6 ve BF8 modellerinde olmak üzere ayrı ayrı elde edilmektedir.



Şekil 7.51. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın



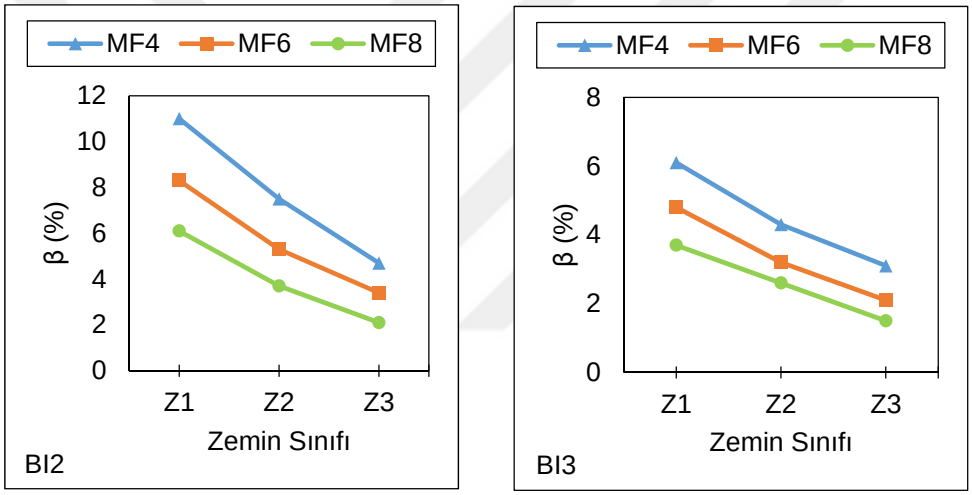
Şekil 7.52. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; KOB depremi etkisi altında sismik taban izolasyonsuz merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum rölatif deplasmanın

Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu modeller üzerindeki etkisini değerlendirmek için, Denklem 7.14'te verildiği gibi, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik taban izolasyonlu modelde oluşan maksimum rölatif

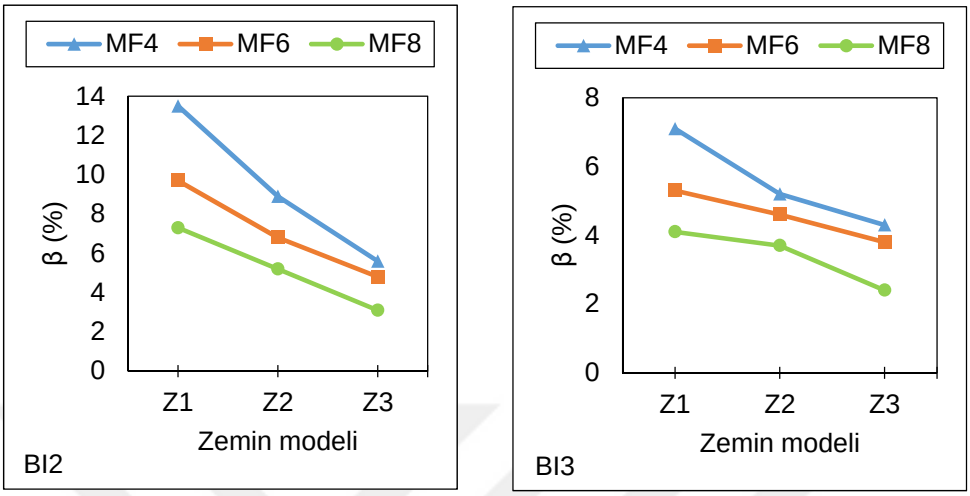
deplasmanın (Δ_{BS}), yapı-zemin etkileşimi olmadan sismik taban izolasyonlu modelde oluşan maksimum rölatif deplasmana (Δ_B) göre oranı elde edilemektedir. Bu oran, β ile gösterilmektedir.

$$\beta = \frac{\Delta_{BS}}{\Delta_B} \tag{7.14}$$

ELC ve KOB depremleri etkisinde, moment aktaran (MF) yapısal modeller için elde edilen β oranı, sırayla Şekil 7.53 ve Şekik 7.54'te gösterilmektedir.

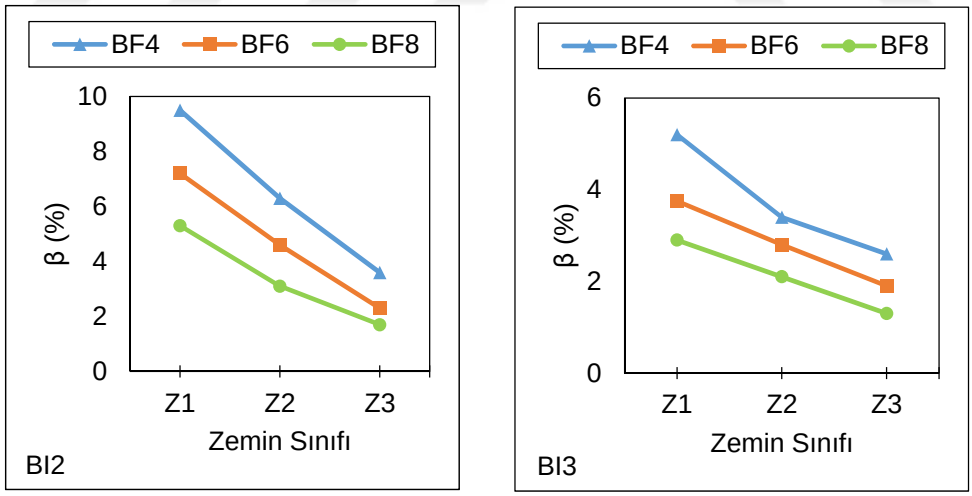


Şekil 7.53. ELC depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen β oranı

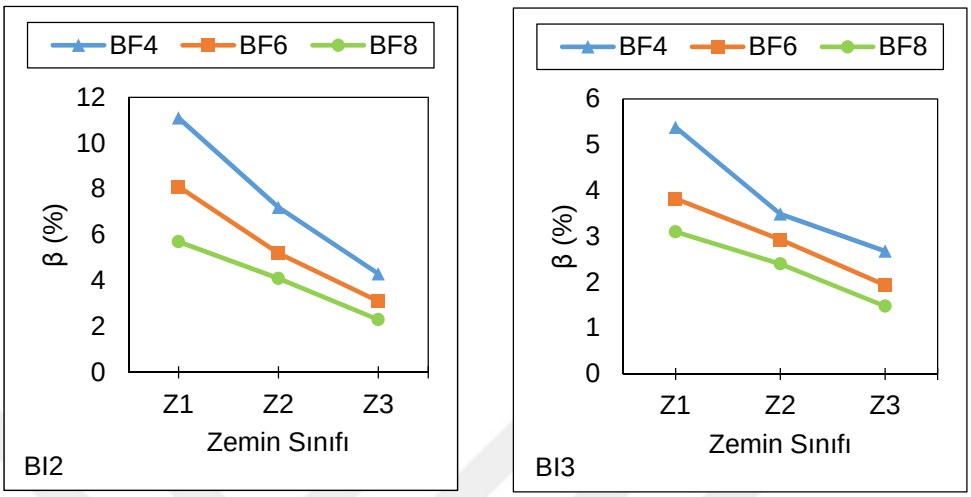


Şekil 7.54. KOB depremi etkisinde moment dayanımlı modeller için elde edilen β oranı

ELC ve KOB depremleri etkisinde, merkezi çaprazlı (BF) yapısal modeller için elde edilen β oranı, sırayla Şekil 7.55 ve Şekik 7.56'da gösterilmektedir.



Şekil 7.55. ELC depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen β oranı



Şekil 7.56. KOB depremi etkisinde merkez çaprazlı modeller için elde edilen β oranı

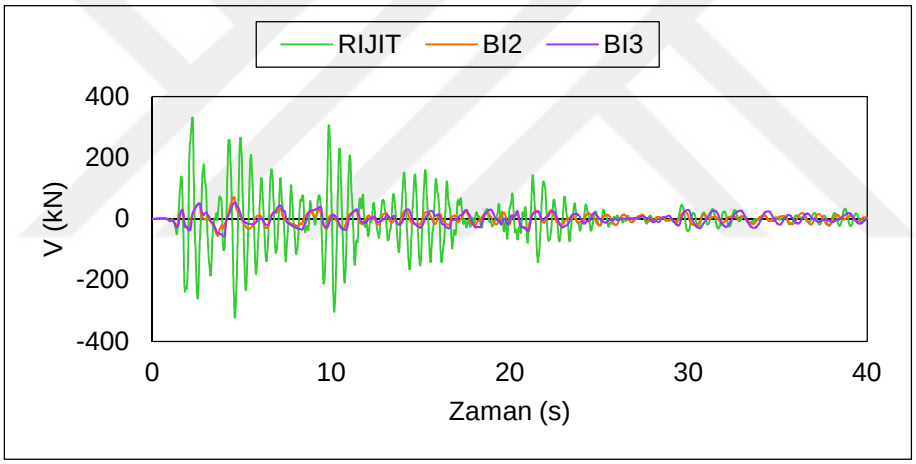
Yukarıdaki şekiller dikkatle incelendiğinde, sismik taban izolasyon sistemi performansının yumuşak zeminlerde düştüğü görülmektedir.

7.7.2.3. Taban Kesme Kuvveti

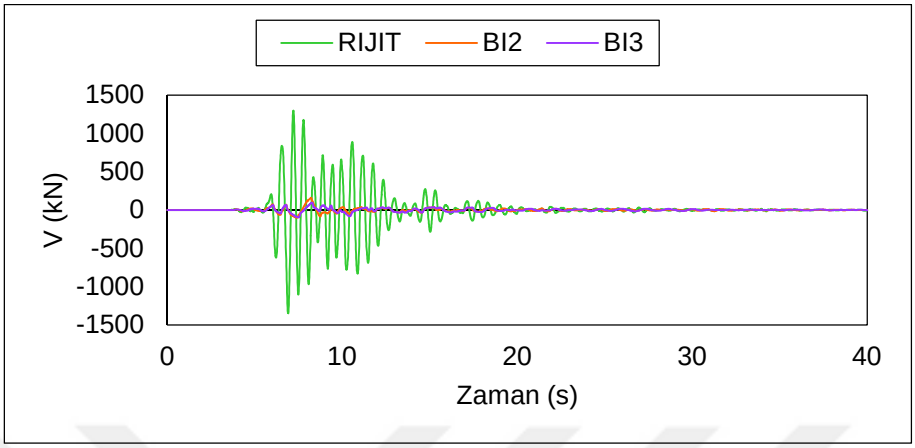
Yapı-zemin etkileşimi olmadan ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yapısal modellerde oluşan taban kesme kuvvetinin dinamik davranış üzerindeki etkileri bu bölümde incelenmektedir.

a) Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınmadan Yapısal Modellerde Oluşan Taban Kesme Kuvveti

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF4 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.57'de ve Şekil 7.58'de verilmektedir.

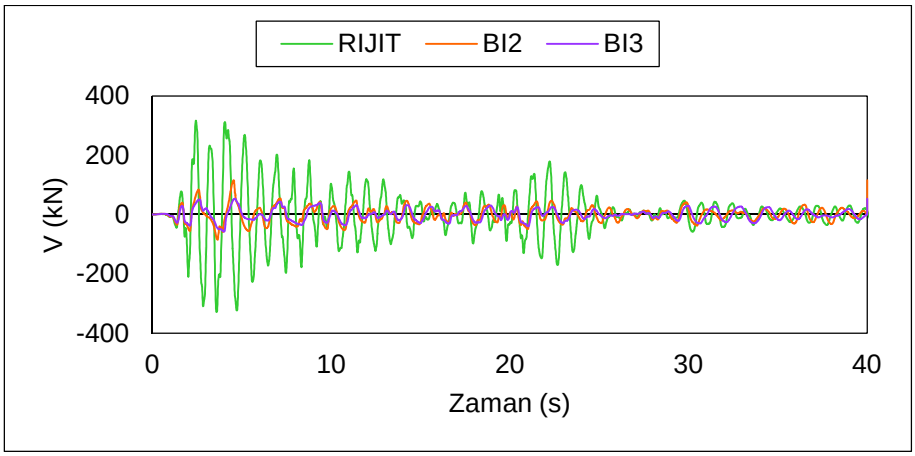


Şekil 7.57. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

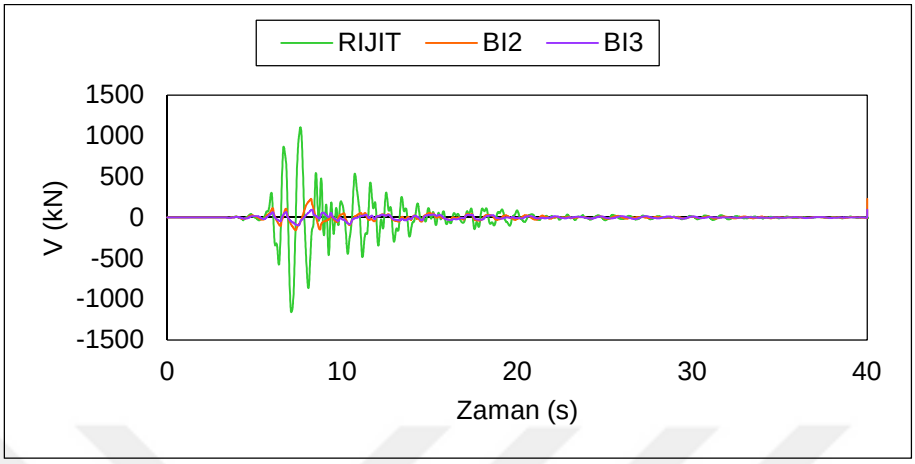


Şekil 7.58. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF6 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.59'da ve Şekil 7.60'ta verilmektedir.

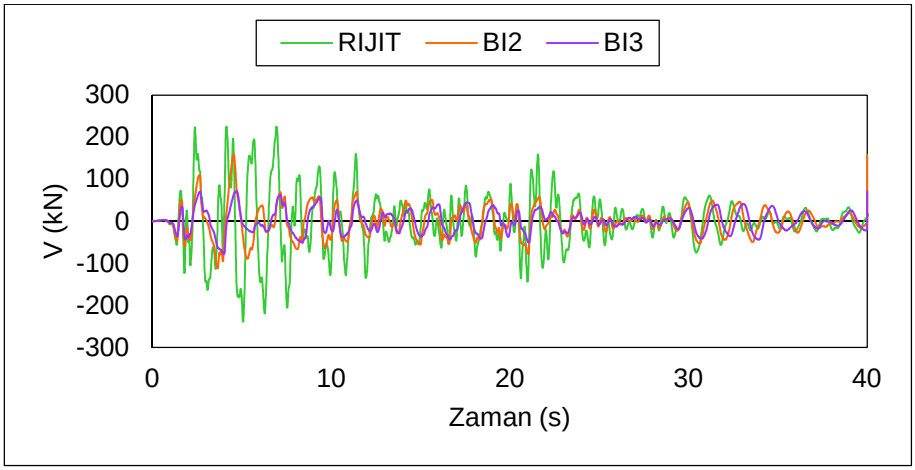


Şekil 7.59. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

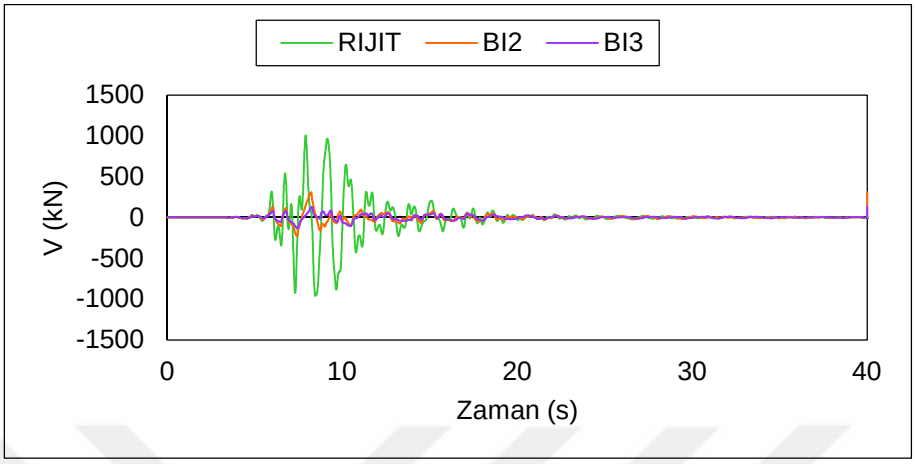


Şekil 7.60. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF8 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.61'de ve Şekil 7.62'de verilmektedir.

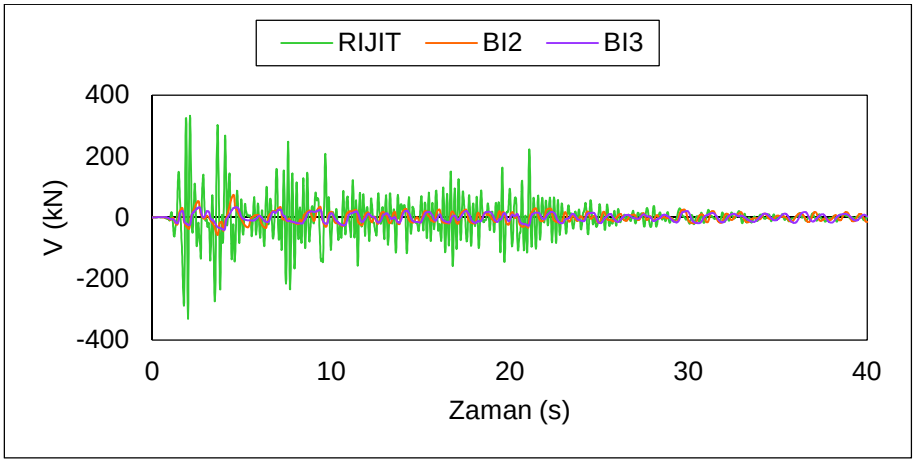


Şekil 7.61. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

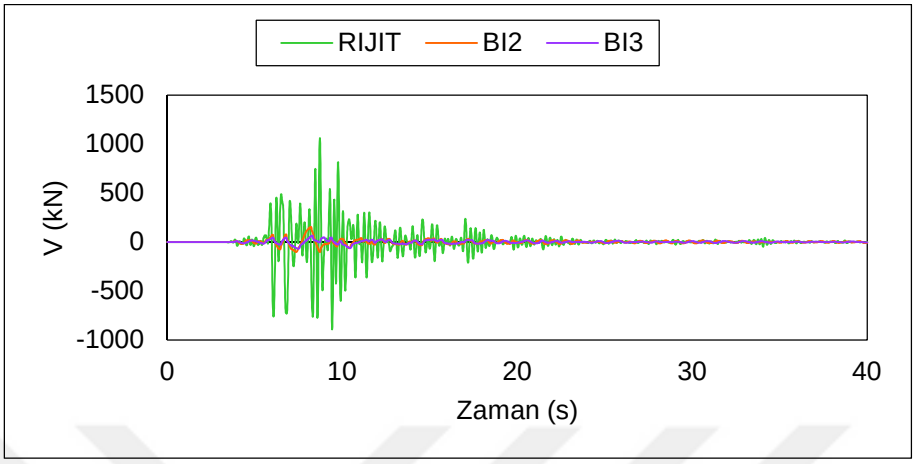


Şekil 7.62. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF4 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.63'te ve Şekil 7.64'te verilmektedir.

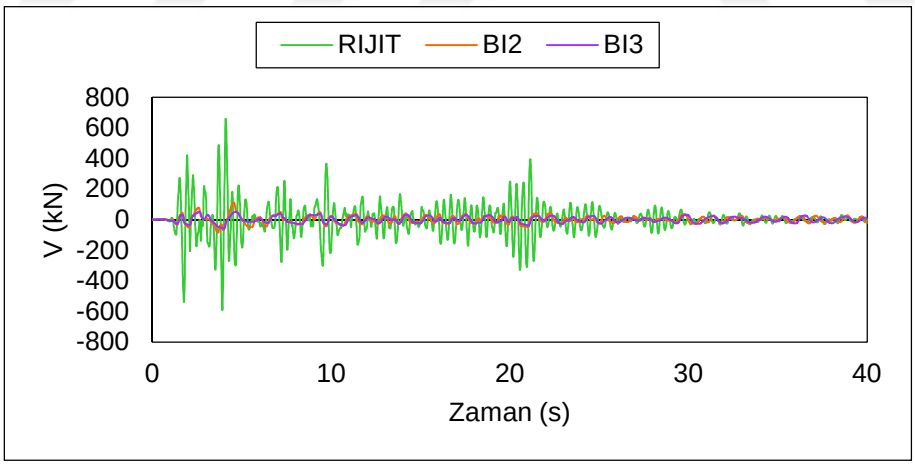


Şekil 7.63. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

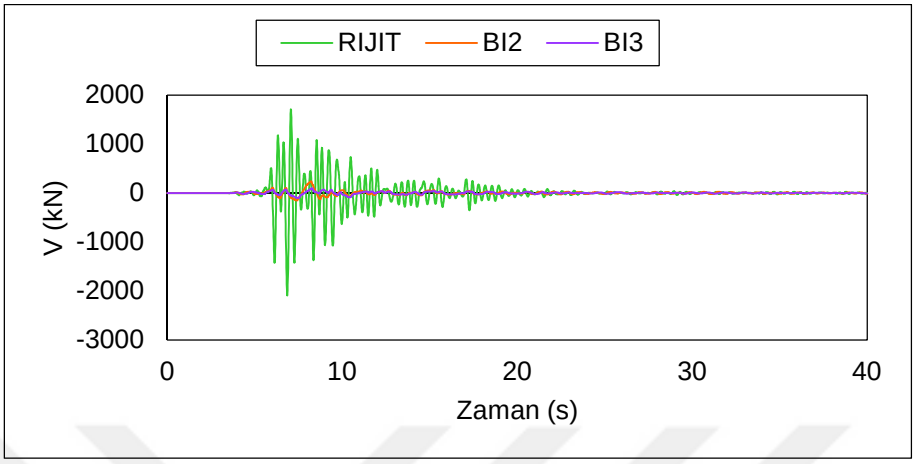


Şekil 7.64. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF6 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.65'te ve Şekil 7.66'da verilmektedir.

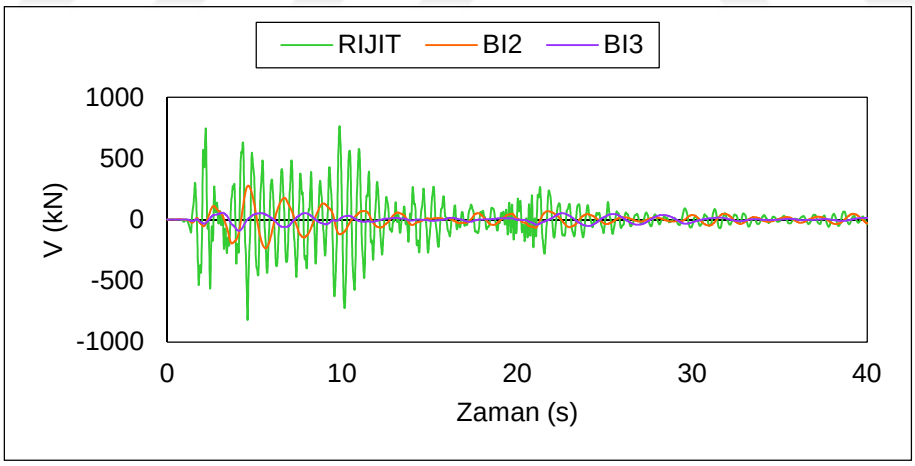


Şekil 7.65. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

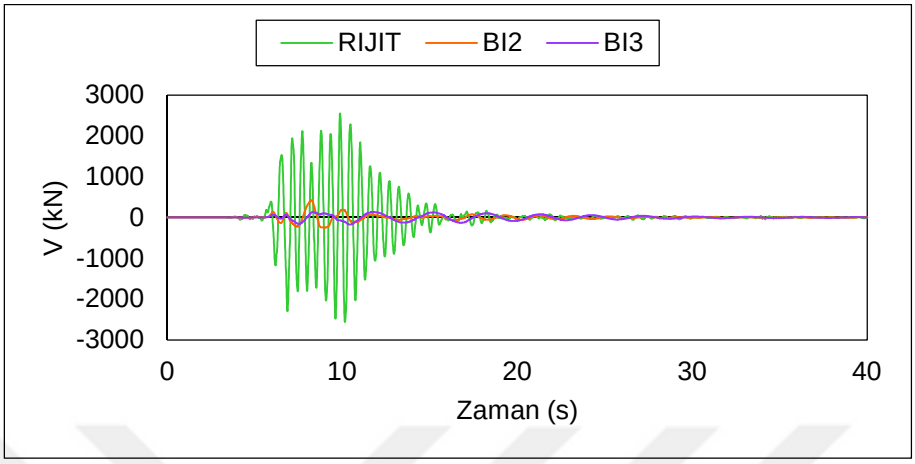


Şekil 7.66. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF8 modelinin, taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri, Şekil 7.67'de ve Şekil 7.68'de verilmektedir.



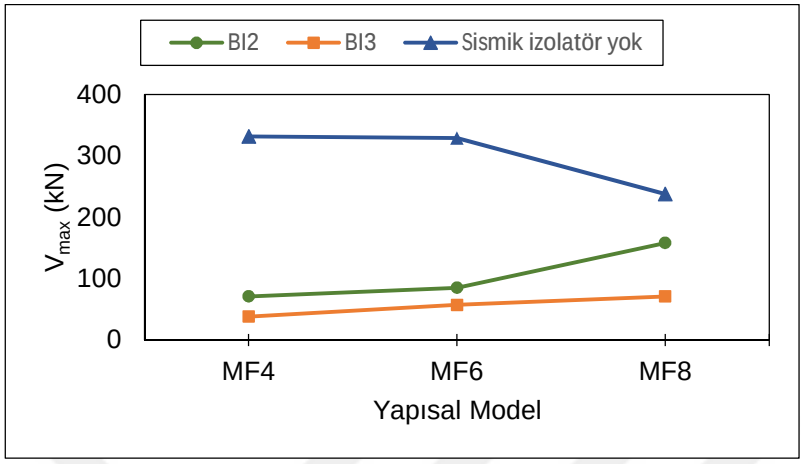
Şekil 7.67. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri



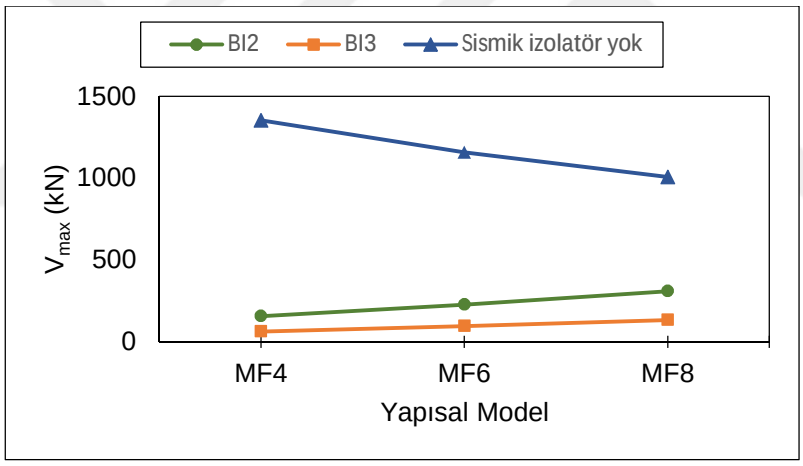
Şekil 7.66. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Grafiklerden görüldüğü gibi, merkezi çaprazlı (BF) ve moment aktaran (MF) modellerde oluşan taban kesme kuvveti, sismik taban izolasyonlu modellerde taban izolasyonsuz modellere göre daha küçüktür. Ayrıca sismik izolatörlü modellerde, izolatörün rijitliği azaldıkça, yapıda oluşan taban kesme kuvveti de azalmaktadır.

Yapı-zemin etkileşimi olmadan; sismik taban izolasyonsuz ve taban izolasyonlu modellerde oluşan taban kesme kuvvetinin maksimum değerleri elde edilerek karşılaştırılmaktadır. KOB ve ELC depremleri etkisi altında moment aktaran (MF) modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvvetleri Şekil 7.67 ve Şekil 7.68'de verilmektedir. Maksimum taban kesme kuvvetinin, BI3 izolatörü kullanıldığı durumda, BI2 izolatörü kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu şekillerden anlaşılmaktadır.



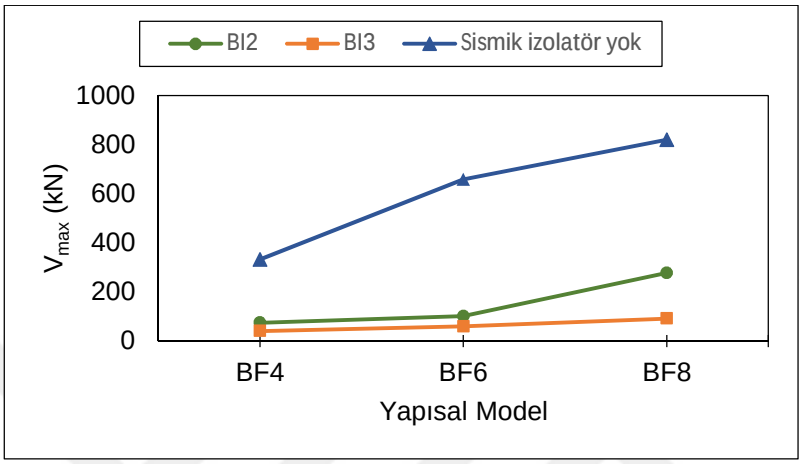
Şekil 7.67. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti



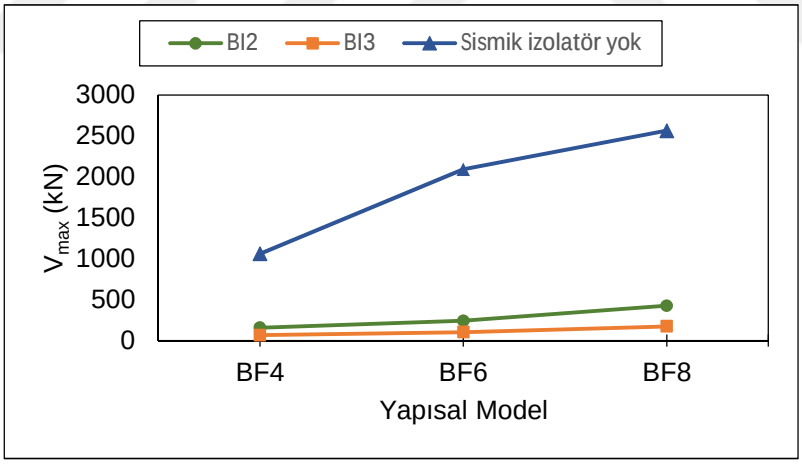
Şekil 7.68. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti

Yapı-zemin etkileşimi olmadan, sismik taban izolasyonsuz ve taban izolasyonlu modellerde oluşan taban kesme kuvvetinin maksimum değerleri elde edilerek karşılaştırılmaktadır. KOB ve ELC depremleri etkisi altında merkezi çaprazlı (BF) modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvvetleri, Şekil 7.69 ve Şekil 7.70'te verilmektedir. Maksimum taban kesme kuvvetinin, BI3 izolatörü

kullanıldığı durumda, BI2 izolatörü kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu, şekillerden anlaşılmaktadır.



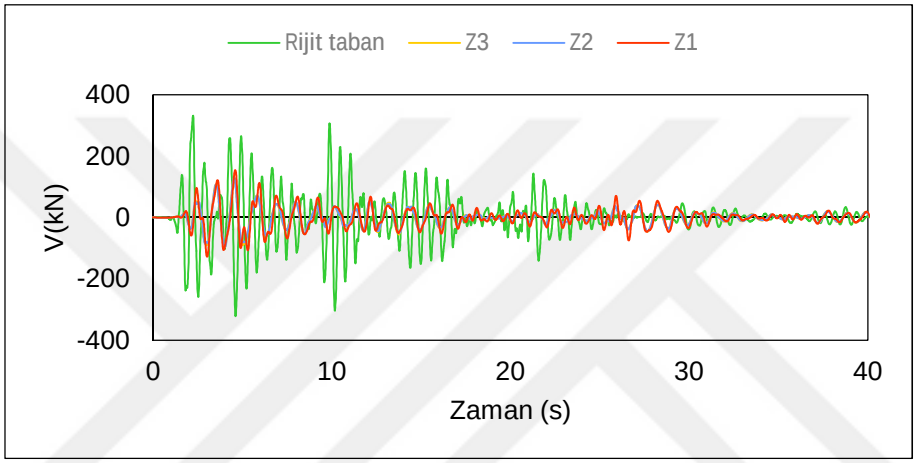
Şekil 7.69. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; ELC depremi etkisi altında merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti



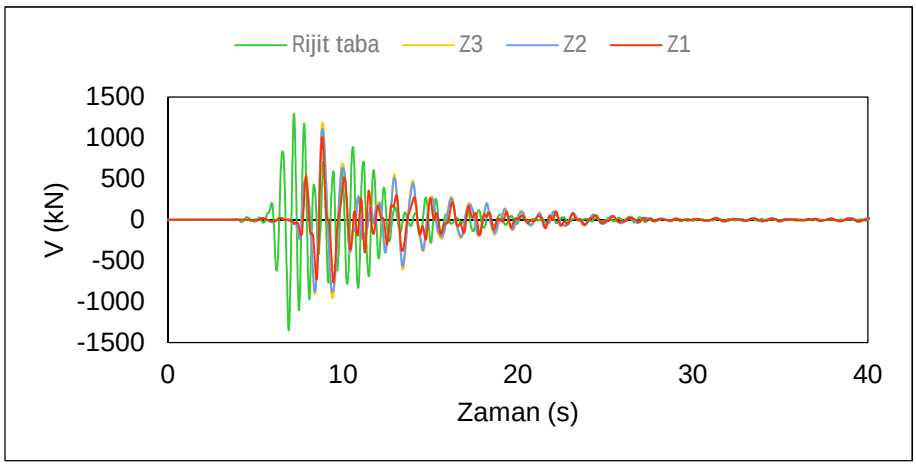
Şekil 7.70. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan; KOB depremi etkisi altında merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti

b) Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapısal Modellerde Oluşan Taban Kesme Kuvveti

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF4 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.71'te ve Şekil 7.72'te verilmektedir.

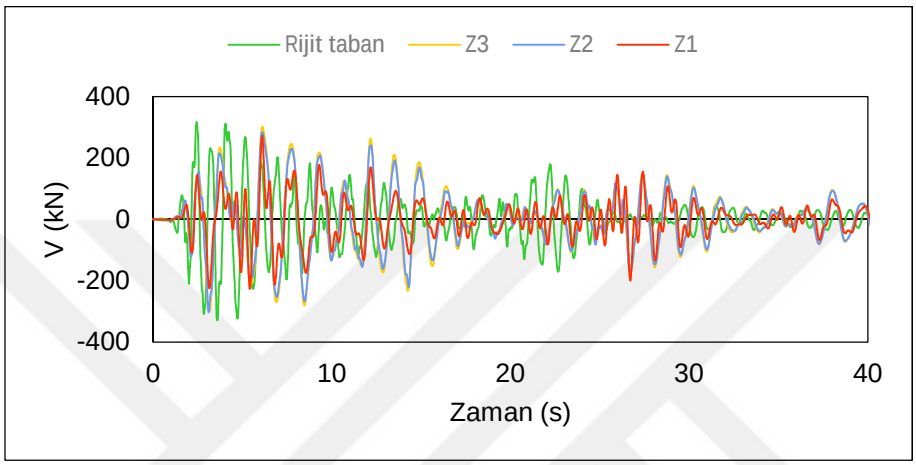


Şekil 7.71. ELC depremi etkisi altında; sismik taban taban izolasyonsuz MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

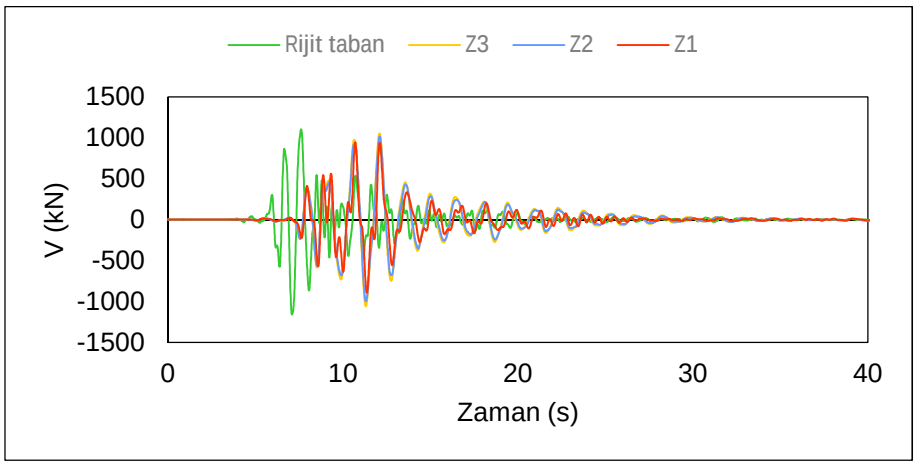


Şekil 7.72. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF6 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.73'te ve Şekil 7.74'de verilmektedir.

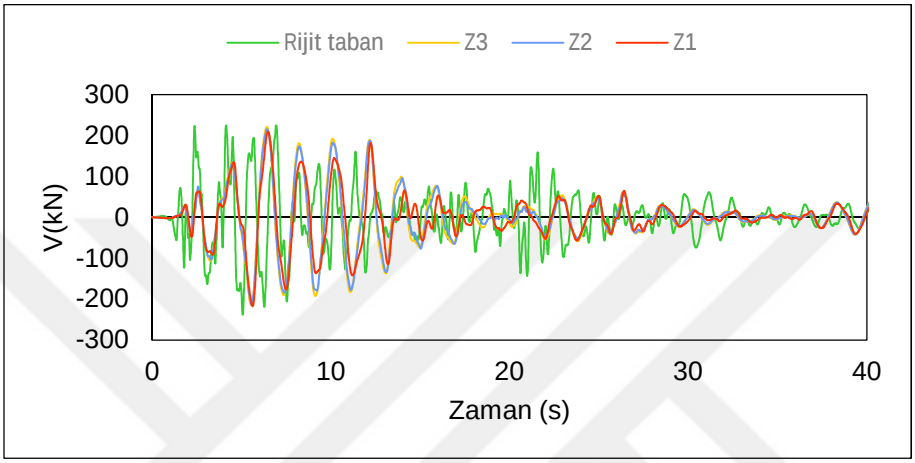


Şekil 7.73. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

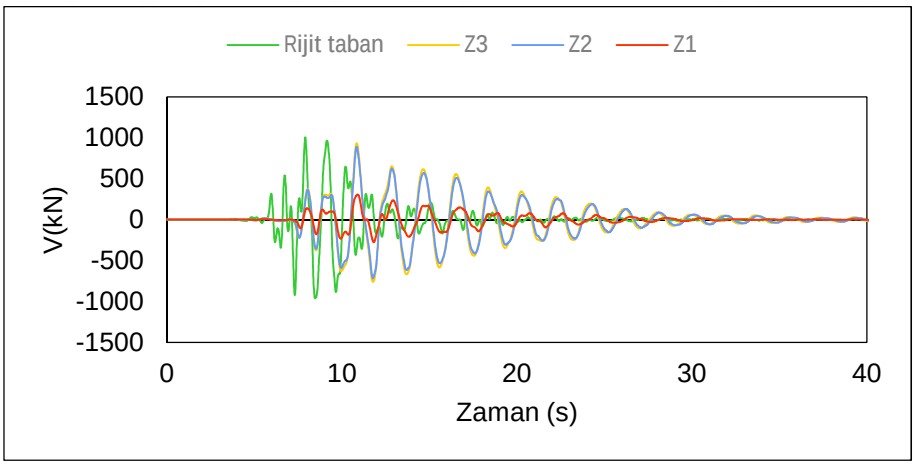


Şekil 7.74. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, MF8 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.75'de ve Şekil 7.76'da verilmektedir.

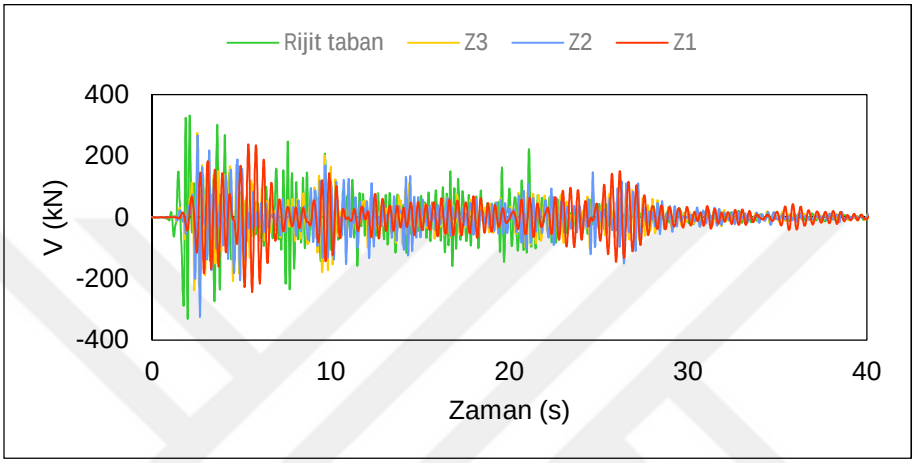


Şekil 7.75. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

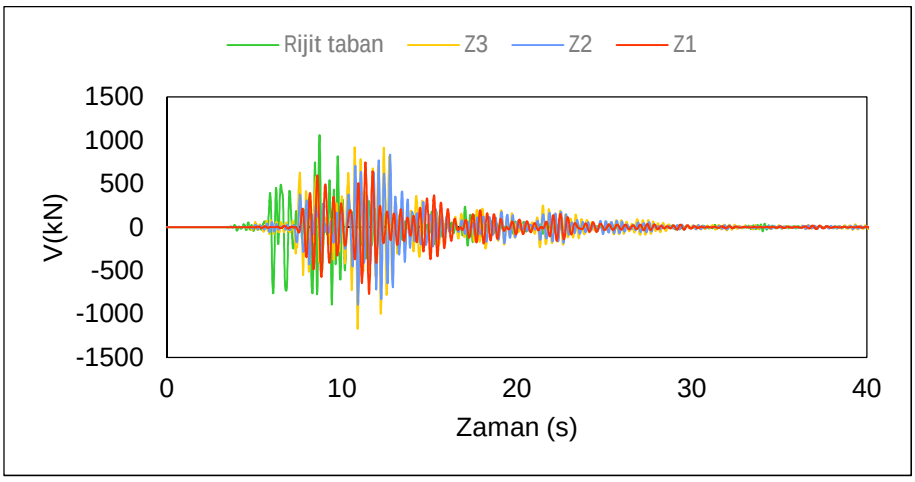


Şekil 7.76. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz MF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF4 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.77'da ve Şekil 7.78'de verilmektedir.

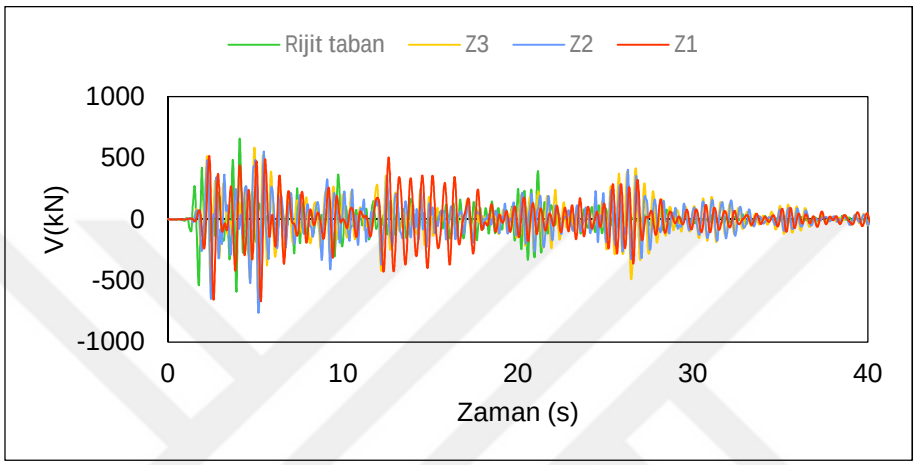


Şekil 7.77. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

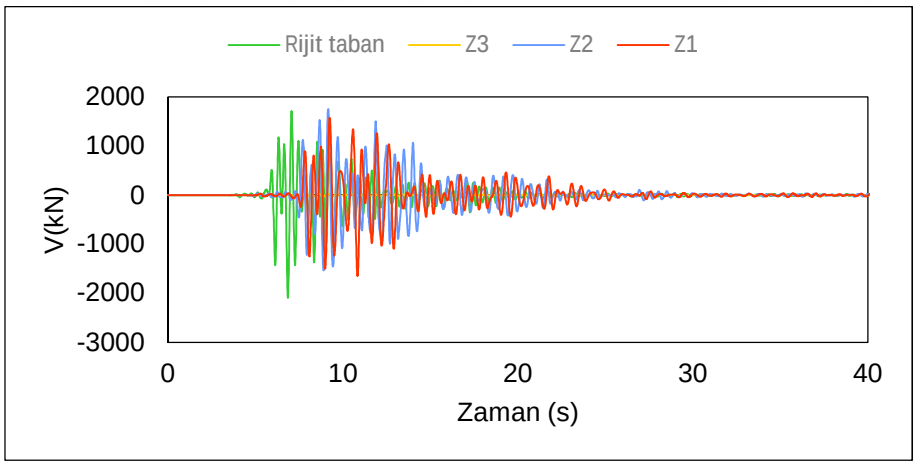


Şekil 7.78. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF4 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF6 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.79'da ve Şekil 7.80 da verilmektedir.

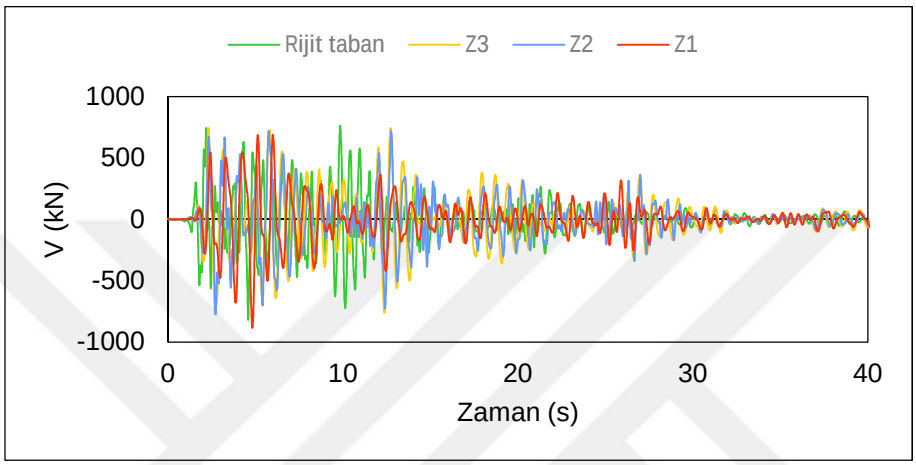


Şekil 7.79. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

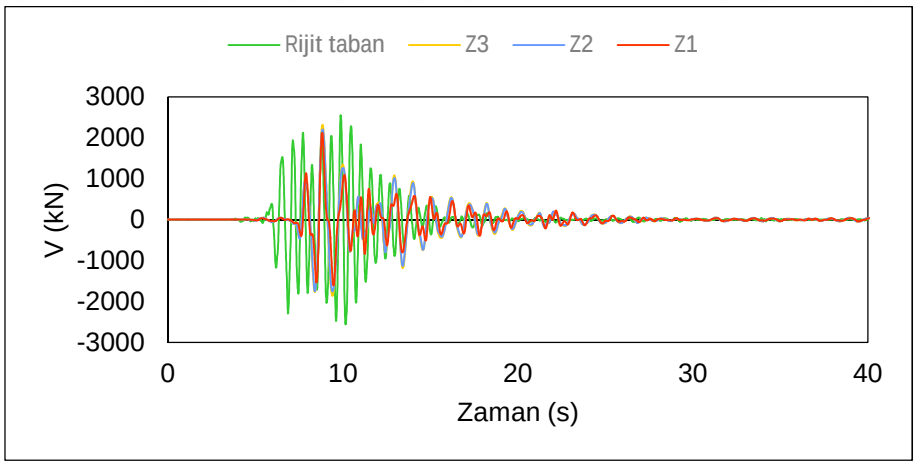


Şekil 7.80. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF6 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimleri

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak; ELC ve KOB depremleri etkisi altında, BF8 modelinin, zaman tanım alanında oluşan taban kesme kuvveti, Şekil 7.81'de ve Şekil 7.82'de verilmektedir.

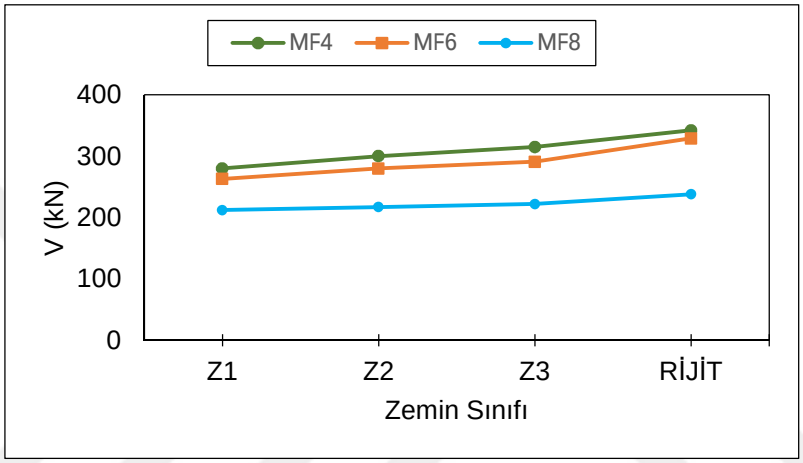


Şekil 7.81. ELC depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman aman ile değişimleri

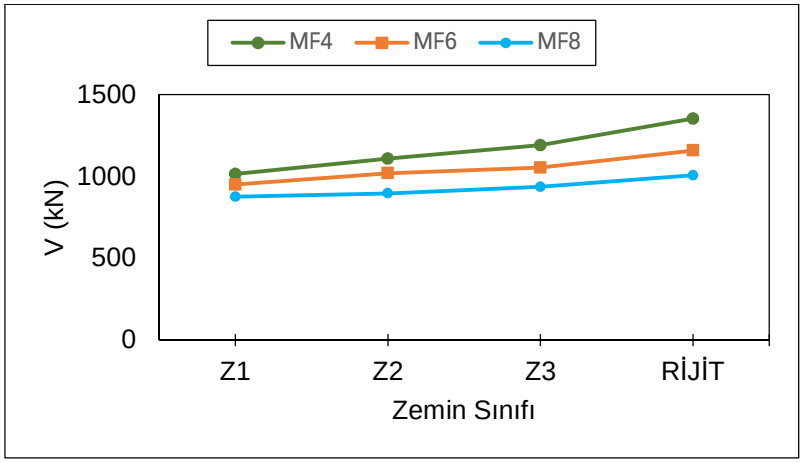


Şekil 7.82. KOB depremi etkisi altında; sismik taban izolasyonsuz BF8 modelinde oluşan taban kesme kuvvetinin zaman ile değişimi

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi, moment aktaran (MF) ve merkezi çaprazlı (BF) modellerde, zemin rijitliği azaldıkça, yapıda oluşan taban kesme kuvveti azalmaktadır. Yapı-zemin etkileşimi etkisinde; moment aktaran modeller (MF) için elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, Şekil 7.83 ve Şekil 7.84'de verilmektedir.

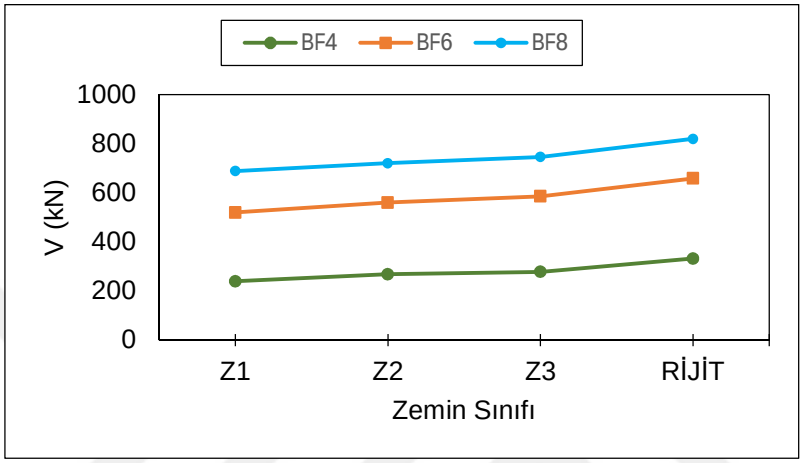


Şekil 7.83. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (ELC depremi)

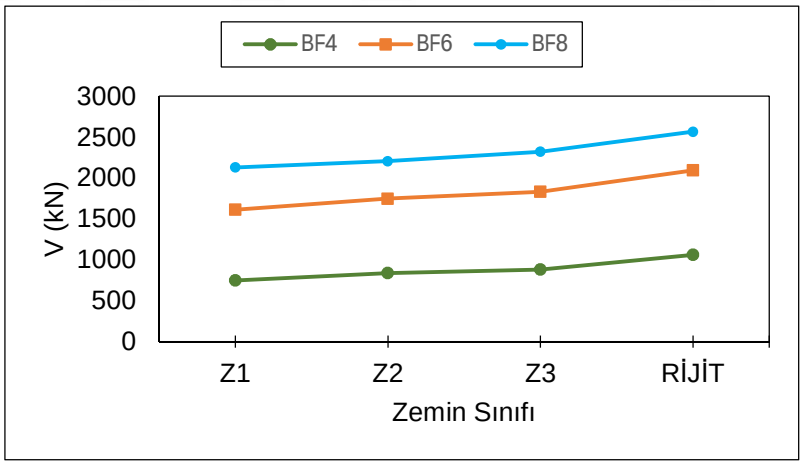


Şekil 7.84. Yapı-zemin etkileşiminin moment aktaran modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (KOB depremi)

Yapı-zemin etkileşimi etkisinde; merkezi çaprazlı modeller (BF) için elde edilen maksimum taban kesme kuvveti ise, Şekil 7.85 ve Şekil 7.86'da verilmektedir.



Şekil 7.85. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (ELC depremi)

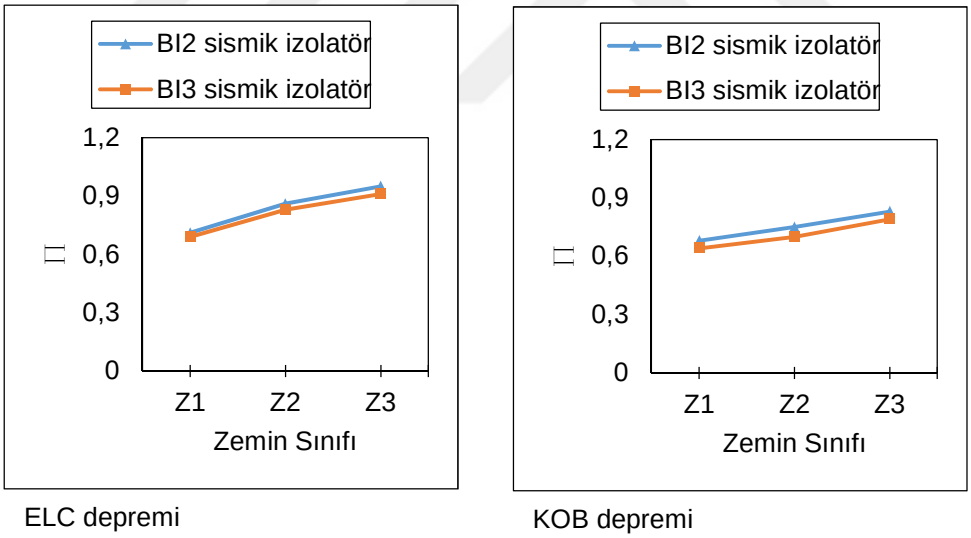


Şekil 7.86. Yapı-zemin etkileşiminin merkezi çaprazlı modellerde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi (KOB depremi)

Yapılarda oluşan maksimum taban kesme kuvvetlerini dikkate alarak, yapı zemin etkileşimi etkisinde yapıda oluşan taban kesme kuvvetinin azaldığı görülmektedir. Bu etki merkezi çaprazlı modellerde, moment aktaran modellere göre daha fazladır.

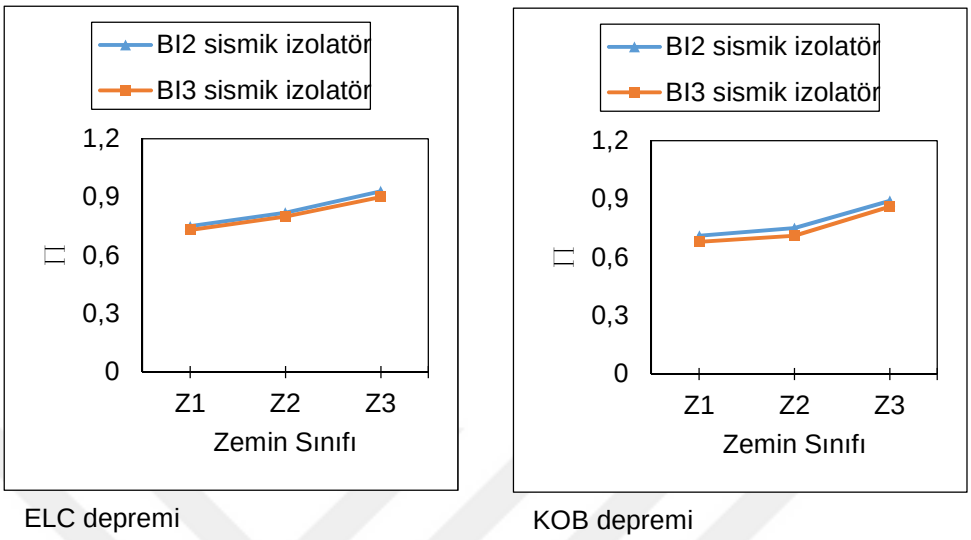
Yapı-zemin etkileşiminin sismik taban izolasyonlu modellerde oluşan taban kesme kuvveti üzerindeki etkiyi incelemek için, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak, yapıda oluşan maksimum taban kuvvetinin (V_s), yapı-zemin etkileşimi olmadan oluşan maksimum taban kesme kuvvetine (V_b) göre oranı elde edilerek gereken değerlendirilmeler yapılmaktadır. Bu oran aşağıda verildiği gibi Π ile gösterilmektedir.

$$\Pi = \frac{V_s}{V_b}$$



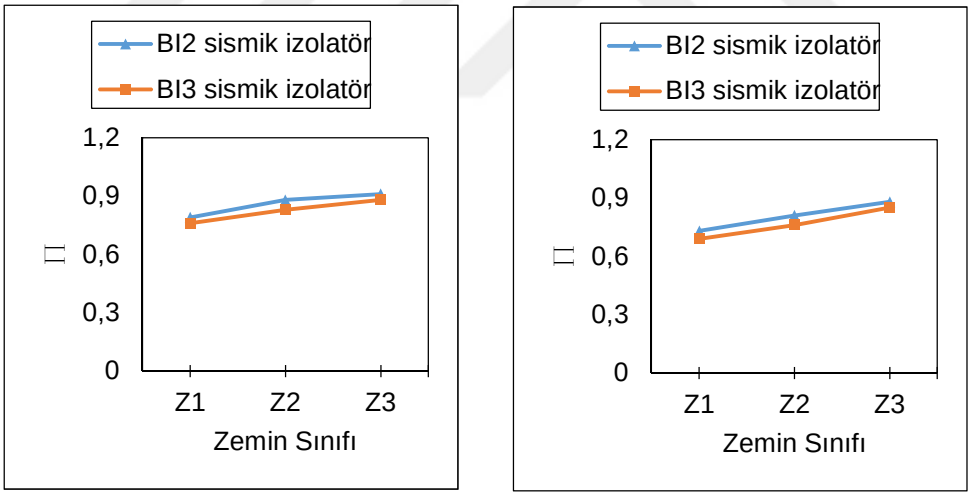
ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.87. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF4 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi



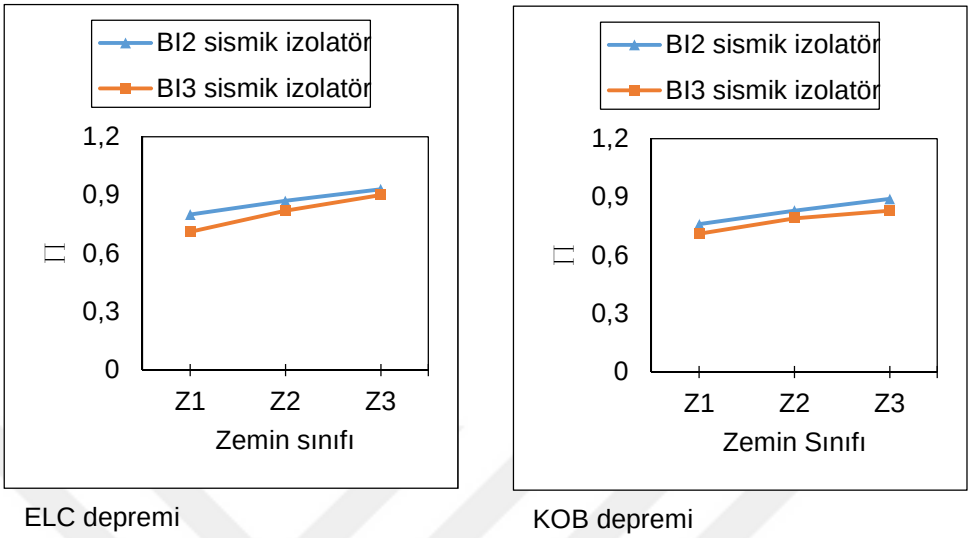
ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.88. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF6 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi



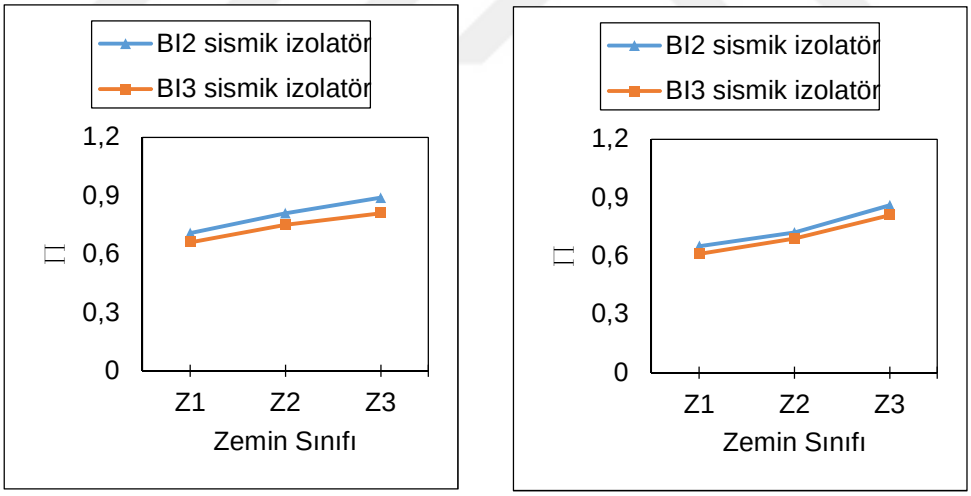
ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.89. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu MF8 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi



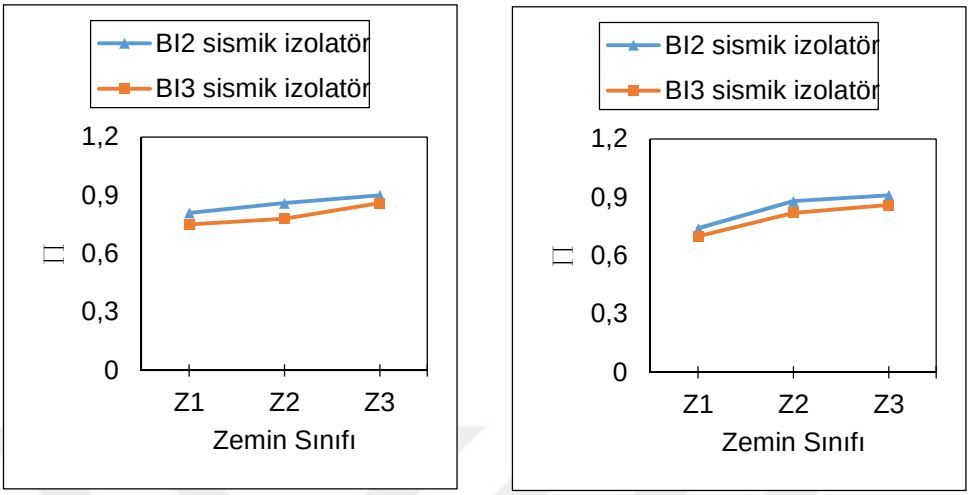
ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.90. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF4 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi



ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.91. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF6 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi



ELC depremi KOB depremi

Şekil 7.92. Yapı-zemin etkileşiminin taban izolasyonlu BF8 modelinde oluşan maksimum taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi

Yukarıdaki resimlerden görüldüğü gibi, yapı-zemin etkileşimi sismik taban izolasyonlu yapıların taban kesme kuvvetini azaltmaktadır. Bu etki merkezi çaprazlı modellerde daha fazla olup, kat adeti arttıkça artmaktadır.

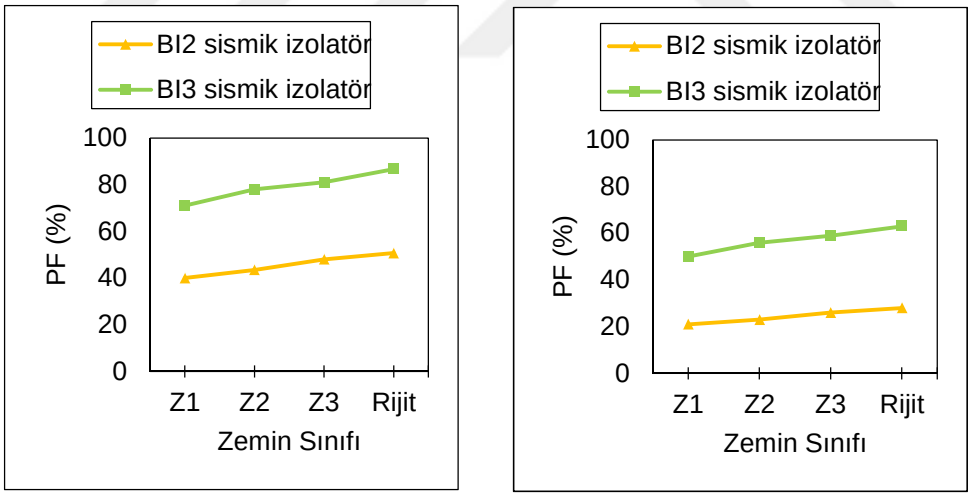
Hatami ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, yapı-zemin etkileşimin sismik taban izolasyonlu yapıların taban kesme kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, yapı-zemin etkileşimi etkisindeki sismik taban izolasyonlu yapının taban kesme kuvvetinin azaldığını göstermiştir. Bu etkinin yumuşak zeminlerde ve çok katlı yapı modellerinde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yumuşak zeminde, taban kesme kuvvetindeki azalma oranı, 2 katlı yapı modeli için %10 ve 10 katlı yapı modeli için %28 elde edilmiştir. Bu oranlar sert ve çok sert zeminler için sırayla %10 ve %5'in altına düşmüştür.

7.7.2.4. Sismik İzolasyon Sisteminin Performansı

Yapı-zemin etkileşiminin sismik izolasyon sisteminin performansı üzerindeki etkisini göstermek için izolasyon performans faktörü, PF, Denklem 7.12'de verildiği gibi tanımlanmaktadır.

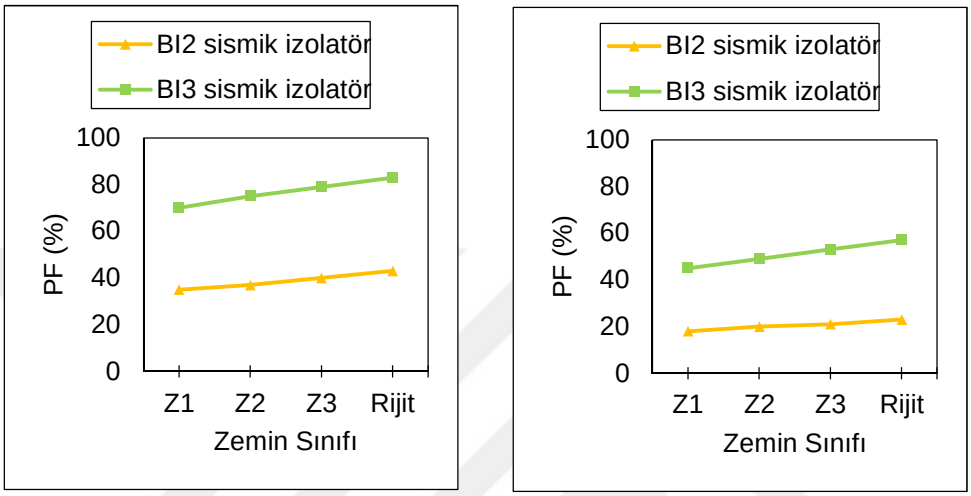
$$\mathrm{PF} = \left(\frac{a_h - a'_h}{a_h}\right) \times 100 \qquad (7.12)$$

Denklemde a_h, sismik izolatör olmadan yapının uç noktasında oluşan maksimum ivmeyi, a'_h ise sismik izolatörlü yapının uç noktasında oluşan maksimum ivmeyi göstermektedir. MF4 modeli için elde edilen sismik izolasyon sistemi performansının zemin özelliklerine göre değişimi, grafiksel olarak Şekil 7.93'de verilmektedir.

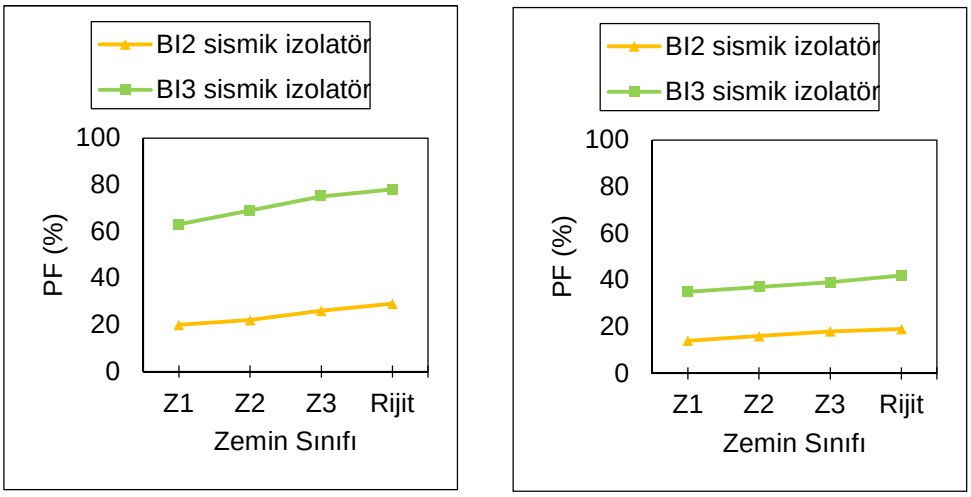


Şekil 7.93. MF4 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri

MF6 ve MF8 modelleri için elde edilen sismik izolasyon sistemi performansının zemin özelliklerine göre değişimi, grafiksel olarak Şekil 7.94 ve Şekil 7.95'de verilmektedir.

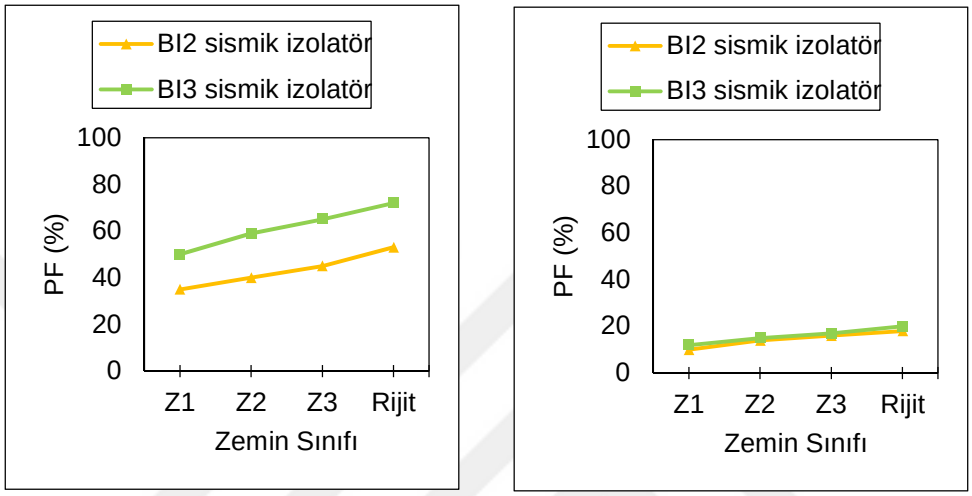


Şekil 7.94. MF6 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri

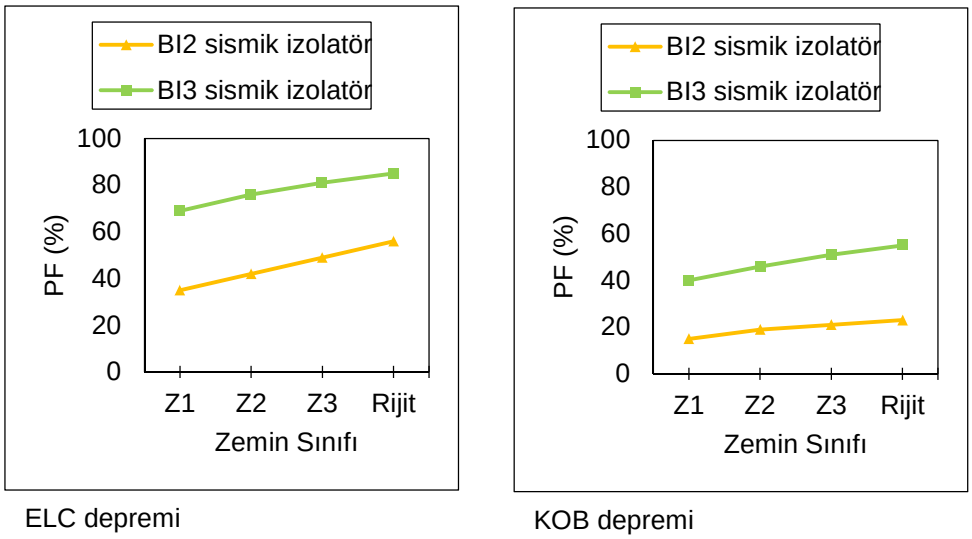


Şekil 7.95. MF8 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri

BF4 ve BF6 modelleri için elde edilen sismik izolasyon sistemi performansının zemin özelliklerine göre değişimi, grafiksel olarak Şekil 7.96 ve Şekil 7.97'de verilmektedir.

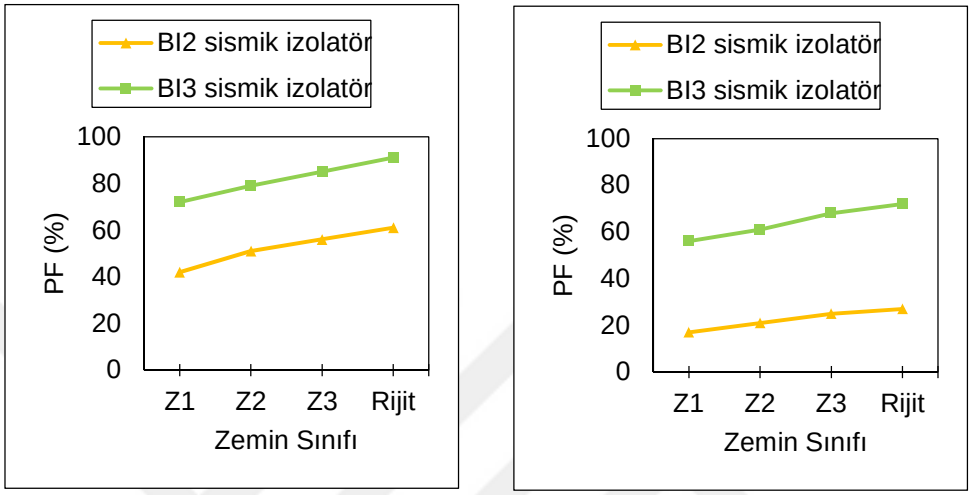


Şekil 7.96. BF4 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri



Şekil 7.97. BF6 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri

BF8 modeli için elde edilen sismik izolasyon sistemi performansının zemin özelliklerine göre değişimi, grafiksel olarak Şekil 7.98'de verilmektedir.



ELC depremi KOB depremi

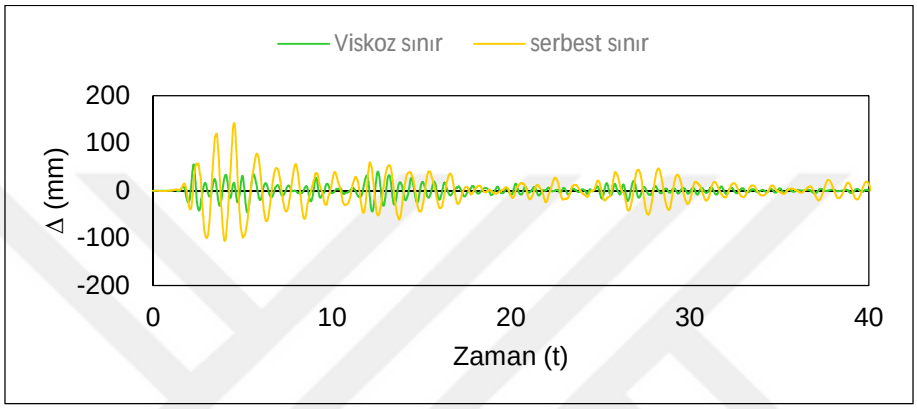
Şekil 7.98. BF8 modeli için elde edilen sismik izolatör performans değerleri

Yukarıdaki şekillerde verilen grafikler, yapı-zemin etkileşimi etkisinde, sismik izolatör performansının azaldığını göstermektedirler. Sert zeminlerde, sismik izolatör performansı, rijit tabanlı yapıya daha yakınken, bu performans zemin rijitliği azaldıkça azalmaktadır. Performanstaki azalma oranı, az katlı yapılarda, yüksek katlı yapılara göre daha fazladır. Ayrıca KOB depreminde, sismik izolatör performansı, zemin özelliklerinden daha az etkilenmektedir. Sismik izolatör özellikleri ile ilgili olarak BI2 sismik izolatöründeki performans azalma oranı, BI3 izolatörüne göre daha fazladır.

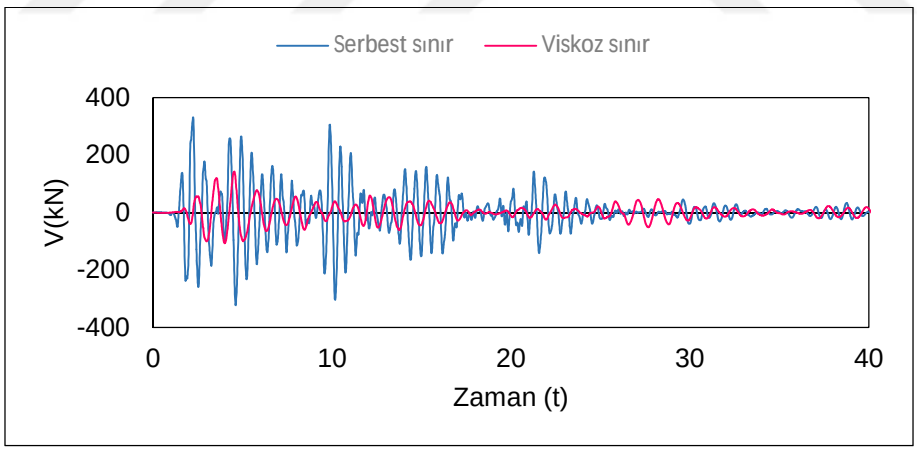
7.7.3. Zemin Sonlu Eleman Modelinde Serbest Sınır Kullanılmasının Sismik Davranışa Etkisi

Yapılan sismik analizlerde, zeminin Sonlu Eleman modelinde, geçirgen sınırların modellenmesi için viskoz sınır modeli kullanılmıştır. Genelde bu konuda kullanılan diğer bir yöntem ise, söz konusu sınırların serbest olmasıdır. Bu

bölümde, Sonlu Eleman modelinde, viskoz sınır yerine serbest sınır kullanılması durumunun sistemin davranışına etkisi incelenmektedir. Sonuçlar, MF4 yapı modeli için sunulmaktadır. Elde edilen rölatif deplasman ve taban kesme kuvvetlerinin, zaman ile değişimleri Şekil 7.99 ve Şekil 7.100'de verilmektedir.



Şekil 7.99. Viskoz sınır ve serbest sınır durumlarında MF4 modeli için elde edilen rölatif deplasman



Şekil 7.100. Viskoz sınır ve serbest sınır durumlarında MF4 modeli için elde edilen taban kesme kuvveti

Yukarıdaki grafiklerden anlaşılmaktadır ki, serbest sınır kullanımının önemli ölçüde sonuçları etkilediği, dolaysıyla davranışın bozulduğu gözlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sismik taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz moment aktaran ve merkezi çaprazlı çelik yapı modellerinin yapı-zemin etkileşimi altında sismik davranışları sayısal analizler yapılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın, başlangıçta belirlenmiş olan amaçlarına yönelik olarak kat adeti, sismik izolatör, zemin ve deprem özellikleri gibi parametrelerin etkisi dikkate alınmıştır. Analizler, SEY'ne dayalı SAP2000 yazılımı ile, serbest titreşim ve zaman tanım alanında zorlanmış titreşim olarak iki durum için gerçekleştirilmiş olup, ilgili parametreler için sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmanın 1. Bölümünde belirlenen amaçları doğrultusunda elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler özet olarak aşağıda verilmektedir.

Serbest titreşim analizi kısmında aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Sismik taban izolasyonu sistemi önemli ölçüde yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodunu arttırmaktadır. Periyodun artışı sismik izolatörün rijitliği ile ters orantılıdır. İzolatörün rijitliği arttıkça, yapısal modelin doğal serbest titreşim periyodu azalmaktadır.
- Yapı-zemin etkileşimi önemi ölçüde yapısal modellerin doğal serbest titreşim periyodunu arttırmaktadır. Ancak bu artış, sismik taban izolasyonlu modellerde oldukça düşüktür. Sismik izolasyonlu modellerin doğal serbest titreşim periyodu daha çok sismik izolatörün özelliklerinden etkilenmektedir.
- Yapı-zemin etkileşiminin, üstyapı doğal serbest titreşim periyoduna etkisine yönelik yapılan incelemeler göstermiştir ki, üstyapı özellikleri bu konuda önemli bir etkendir. Üstyapı yatay rijitliği arttıkça (az katlı ve merkezi çaprazlı yapısal modellerde) yapı-zemin etkileşiminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi daha da önem kazanmaktadır.

Maksimum doğal serbest titreşim periyodu %51 artış oranı ile merkezi çaprazlı BF4 modeli ve Z1 zemin sınıfı için elde edilmiştir.

- Sismik taban izolasyonlu modellerde, zemin rijitliği azaldıkça, yapı-zemin etkileşiminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi artmaktadır.
- Sismik izolatör rijitliği azaldıkça zeminin yapı doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi azalmaktadır.
- Sismik taban izolasyonlu modellerde, kat adeti arttıkça, zeminin doğal serbest titreşim periyodu üzerindeki etkisi artmaktadır. Maksimum artış moment aktaran MF8 modelinde, %6.35 olarak elde edilmektedir.

Zorlanmış titreşim analizi kısmında aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Sismik taban izolasyonu sistemi yapısal modellerde oluşan rölatif deplasmanı önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan incelemeler sismik izolatörün bu konuda önemli bir etken olduğunu göstermektedir. BI3 izolatör tipinde oluşan rölatif deplasman, BI2 izolatöre göre daha düşüktür. Üstyapı sistemi ve kat adeti, sistemde oluşan rölatif deplasmanı etkilemektedirler. Rölatif deplasman azalma oranı; yüksek katlı yapılarda daha büyükken, az katlı yapılar için bu oran azalmaktadır. Merkezi çaprazlı sistemlerdeki azalma oranı, moment aktaran sistemlere göre daha büyük olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.
- Yapı-zemin etkileşimi, sismik taban izolasyonsuz yapısal modellerde oluşan rölatif deplasmanı azaltmaktadır. Zemin rijitliğinin bu konuda önemli bir etken olduğu görülmektedir. Yumuşak zeminlerde azalma oranı daha büyük iken, sert zeminler için bu oran düşmektedir. Ayrıca üstyapı özellikleri de, yapıda oluşan rölatif deplasmanı etkilemektedirler. Yüksek rijitlik düzeyine sahip modeller, yani az katlı ve merkezi çaprazlı modeller

için zeminden daha fazla etkilenmekte söz konusu olup, bu modellerdeki rölatif deplasman azalma oranı daha yüksektir.

- Yapı-zemin etkileşimi etkisinde, sismik izolatörün performansı azalmaktadır. Sert zeminlerde sismik izolatör performansı, rijit tabanlı yapıya daha yakınken, bu performans zemin rijitliği azaldıkça azalmaktadır. Performanstaki azalma oranı, az katlı yapılarda, yüksek katlı yapılara göre daha fazladır. Ayrıca KOB depreminde, sismik izolatör performansı, zemin özelliklerinden daha az etkilenmektedir. Sismik izolatör özellikleri ile ilgili olarak BI2 sismik izolatöründeki performans azalma oranı, BI3 izolatörüne göre daha fazladır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, yapı-zemin etkileşimi taban izolasyonlu çelik çerçevelerin sismik davranışlarını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu etki, zemin, üstyapı, sismik izolatör ve deprem özelliklerine göre değişim göstermektedir. Bu yüzden, sismik taban izolasyonlu sistemler ile ilgili tasarım standartlarında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması önem kazanmaktadır. Özellikle izolatörde oluşan maksimum deplasman ve yapı taban kesme kuvvetinin hesabında zemin etkilerinin dikkate alınması uygun bulunmaktadır.

Çalışmanın konusu ile ilgili olarak ve devamında, gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili, aşağıda verilen konular önerilmektedir.

1) Yapı-zemin etkileşimi çalışmasında nonlineer zemin davranışının dikkate alınması.
2) Sismik izolatör mekanik özelliklerinin daha detaylı bir şekilde ele alınması, özellikle izolatör sönüm oranın dikkate alınması gelecekte yapılacak çalışmalar için önem arz etmektedir.
3) Teorik çalışmanın güçlendirilmesi bakımından, konu ile ilgili deneysel bir çalışmanın yapılması .

KAYNAKLAR

ASCE 7-05, 2006. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE Standard ASCE/SEI 7-05). American Society of Civil Engineers, Virginia, USA.

Alam, A.K.M.T., Bhuiyan, M.A.R., 2013. Effect of Soil-Structure Interaction on Seismic Response of a Seismically Isolated Highway Bridge Pier. Journal of Civil Engineering, 41(2):179-199.

ATC 40, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council, Redwood City, California, USA.

Awwad, T., Donia, M. 2016. The effi ciency of using a seismic base isolation system for a 2D concrete frame founded upon improved soft soil with rigid inclusions. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 15: 49-60.

Baran, T., 2008. Yapıların Dinamik Davranışının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Ç. Ü. Doktora Tezi, Adana, 117s.

Balkaya, C., Yuksel, S.B., Derinoz, O., 2012. Soil-Structure Interaction Effects on the Fundamental Periods of the Shear-Wall Dominant Buildings. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 21(6):416-430.

Bhattacharya, K., Dutta, S.C., 2004. Assessing Lateral Period of Building Frames Incorporating Soil Flexibility. Journal of Sound and Vibration, 269(3):795-821

Bull, J. W., 1994. Soil-Structure Interaction: Numerical Analysis and Modeling. E & FN SPON. London, UK. 727 p.

Castaldo, P., Ripani, M., 2016. Optimal Design of Friction Pendulum System Properties for Isolated Structures Considering Different Soil Conditions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90: 74-87.

Canini, A., Forcellini, D., 2017. 3D Numerical Simulations of a Base-Isolated Residential Building with Soil Structure Interaction. 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Rhodes Island, Greece, 15–17 June.

Cesare, A.D., Ponzo, F.C., Nigro, D., Moccia, D., 2011. Dynamic Tests On a Steel Frame Equipped With Hysteretic and Visco-Re-Centring Energy Dissipating Bracing Systems. Procedia Engineering, 14: 2931-2940.

Chau, K.T., Shen, C.Y., Guo, X., 2009. Nonlinear Seismic Soil–Pile– Structure Interactions: Shaking Table Tests and FEM Analyses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29: 300-310.

Chaudhary, M.T.A., Abe, M., Fujino, Y., 2001. Identification of Soil-Structure Interaction Effect in Base Isolated Bridges from Earthquake Records. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21: 713-725.

Chen, J., Shi, X., Li,J., 2010. Shaking Table Test of Utility Tunnel Under Non-Uniform Earthquake Wave Excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30:1400-1416.

Cho, K.H., Kim, M.K., Lim, Y.M., Cho, S.Y., 2004. Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Considering Fluid–Structure–Soil Interaction in Time Domain. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24: 839-852.

Chopra, A.K., 2007. Dynamic of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA. 526 p.

Colunga, A.T., Rocha, L.P., Aviles, J., Macias, C.C., Seismic Isolation of Buildings for Power Stations Considering Soil-Structure Interaction Effects. Journal of Building Engineering, 4: 21-40.

Constantinou, M.C., Kneifati, M.C., 1988. Dynamics of Soil-Base-Isolated-Structure Systems. J. Struct. Eng., 114(1): 211-221.

CSI, 2017. CSI Analysis Reference Manual. Computers & Structures, Inc. California, USA. 534 P.

Datta, T.K., 2010. Seismic Analysis of Structures. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. Singapore. 454 P.

Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö., 2008. Çelik Yapılar. Üçüncü Baskı. Çağlayan Basımevi. İstanbul.

Dutta, S.C., Roy, R., 2002. A Critical Review on Idealization and Modeling for Interaction among Soil-Foundation-Structure System. Computers and Structures, 80(20):1579-1594

Dutta, S.C., Bhattacharya, K., Roy, R., 2004. Response of Low-Rise Buildings under Seismic Ground Excitation Incorporating Soil–Structure Interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24:893-914.

Drosos, V.A., Sitar, N., 2015. Soil-Structure Interaction Effects on Seismically Isolated Nuclear Power Plants. IFCEE, Texas, USA.

Elnashaı, A.S., Sarno, L.D., 2008. Fundamentals Of Earthquake Engineering. John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom.

Eurocode 8, 2004. Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions And Rules For Buildings (EN 1998-1: 2004). European Committee for Normalization (CEN), Belgium.

FEMA 450, 2003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Building Seismic Safety Council BSSC, Washington, D.C., USA.

FEMA 440, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Applied Technical Council, Redwood City, USA.

FEMA 356, 2000. Pre Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

FEMA 547, 2006. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. 2006 Edition. Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C., USA.

Forcellini, D., 2017. Seismic Resilience of Isolated Bridge Configurations with Soil-Structure Interaction. Innovative Infrastructure Solutions, 2(2):

Fukumoto, Y., Lee, G., 1992. Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading. CRC Press. Florida, USA. 384 P.

Ganjavi, B., Hao, H., 2012. A Parametric Study on the Evaluation of Ductility Demand Distribution in Multi Degree of Freedom Systems Considering Soil–Structure Interaction Effects. Engineering Structures, 43: 88-104.

Gao, X., Ling, X.Z., Tang, L., Xu, P.J., 2011. Soil–Pile-Bridge Structure Interaction in Liquefying Ground Using Shake Table Testing. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31: 1009-1017.

Gerolymos, N., Gazetas, G., 2006. Development of Winkler Model for Static and Dynamic Response of Caisson Foundations with Soil and Interface Nonlinearities. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26(5):363-376.

Haıfeng, Y., Wenyu, Z., Yaochun, Z., Yusong, S., 2010. Shaking Table Test And Numerical Analysis Of A 1:12 Scale Model Of A Special Concentrically Braced Steel Frame With Pinned Connections. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 9(1): 51-63.

Haıyang, Z., Xu, Y., Chao, Z., Dandan, J.,2014. Shaking Table Tests for the Seismic Response of a Base-Isolated Structure with the SSI Effect. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67: 208-218.

Halabian, A.M., Naggar, M.H.E., 2002. Effect of Non-Linear Soil–Structure Interaction on Seismic Response of Tall Slender Structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22: 639-658.

Han, Y., 2002. Seismic Response of Tall Building Considering Soil-Pile-Structure Interaction. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1(1):57-64.

Harris, H. G., Sabnis, G. M., 1999. Structural Modelling and Experimental Techniques. Second Edition, CRC Press Llc. Florida, USA. 512 P.

Hatami, F., Nademi, H., Rahaie, M., 2015. Effects of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Base Isolated In High-Rise Building. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 4(3): 237-242.

Hokmabadi, A.S., Fattahi, B., Samali, B., 2014. Assessment of Soil–Pile–Structure Interaction Influencing Seismic Response of Mid-Rise Buildings Sitting On Floating Pile Foundations. Computers and Geotechnics, 55: 172-186.

Ji, F.M., Feng, W.J., Qiang, L. G., 2013. Shaking Table Test of Steel Frame With Alc External Wall Panels. Journal of Constructional Steel Research, 80: 278–286.

Kang, B.S, Li, L., Ku, T. W., 2009. Dynamic Response Characteristics of Seismic Isolation Systems for Building Structures. Journal of Mechanical Science and Technology, 23:2179-2192.

Kim, M.K., Lin, Y.M., Cho, S.Y., Cho, K.H., Lee, K.W., 2002. Seismic Analysis of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Using the BE–FE–BE Coupling Technique. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12):1151-1158.

Kim, S.E., Lee, D.H., Huu, C.N., 2007. Shaking Table Tests of a Two-Story Unbraced Steel Frame. Journal of Constructional Steel Research, 63:412-421.

Krishnamoorthy, A., Anita, S., 2016. Soil–Structure Interaction Analysis of a FPS-Isolated Structure Using Finite Element Model. Structures, 5: 44-57.

Kohnke, P., 1999. Ansys Theory Reference. SAS IP Inc., USA. 1286 P.

Kokusho, T., 2014. Seismic Base-Isolation Mechanism in Liquefied Sand in Terms of Energy. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 63:92-97.

Kumar, K., 2008. Basic Geotechnical Earthquake Engineering. New Age International (P) Ltd., Publishers. New Delhi. 131 P.

Liang, J., Fu, J., Todorovska, M.I., Trifunak, M.D., 2013. Effects of the Site Dynamic Characteristics on Soil–Structure Interaction (I): Incident S-H Waves. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44: 27-37.

Lıgnos, D.G., Chung, Y., Nagae, T., Nakashıma, M., 2011. Numerical and Experimental Evaluation of Seismic Capacity of High-Rise Steel Buildings Subjected to Long Duration Earthquakes. Computers and Structures, 89: 959-967.

Lu, L.Y., Lee, T.Y., Juang, S.Y., Yeh, S.W., 2013. Polynomial Friction Pendulum Isolators (PFPIS) for Building Floor Isolation: An Experimental and Theoretical Study. Engineering Structures, 56: 970-982.

Luco, J.E., 2014. Effects of Soil–Structure Interaction on Seismic Base Isolation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66: 167–177.

Massimino, M.R., Maugeri, M., 2013. Physical Modelling Of Shaking Table Tests on Dynamic Soil-Foundation Interaction and Numerical and Analytical Simulation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 49: 1-18.

Makris, N., Gazetas, G., 1992. Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction. Part II: Lateral and Seismic Response. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 21(2):145-162.

Matsagar, V.A., Jangid, R.S., 2004. Influence of Isolator Characteristics on the Response of Base-Isolated Structures. Engineering Structures, 26: 1735–1749.

Moghaddasi, M., Cubrinovski, M., Chase, J.G., Pampanin, S., Carr, A., 2011. Effects of Soil–Foundation–Structure Interaction on Seismic Structural Response via Robust Monte Carlo Simulation. Engineering Structures, 33: 1338-1347.

Naiem, F., Kelly, J.M., 1999. Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 290 P.

Nakhaei, M., Ghannad, M.A., 2008. The Effect of Soil–Structure Interaction on Damage Index of Buildings. Engineering Structures, 30: 1491-1499.

Nateghi, A. F., Rezaei, A., 2013. Nonlinear Dynamic Response of Tall Buildings Considering Structure-Soil-Structure Effects. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 22(14):1075-1082.

Oh, S.H., Song, S.H., Lee, S.H., Kim, H.J., 2012. Experimental Study Of Seismic Performance of Base-Isolated Frames With U-Shaped Hysteretic Energy Dissipating Devices. Engineering Structures, 56: 2014-2027.

Padron, E.N., Aznarez, J.J., Maeso, O., 2009. Dynamic Structure–Soil–Structure Interaction Between Nearby Piled Buildings under Seismic Excitation by BEM–FEM Model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29: 1084-1096.

Papalou, A., Bielak, J., Bazan, E., 2012. Effects of Isolated Spread Footings on the Dynamics of Soil-Structure Interaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(8): 1033-1036.

Pitilakis, D., Deitz, M., Wood, D.M., Clouteau, D., Modaressi, A., 2008. Numerical Simulation of Dynamic Soil-Structure Interaction in Shaking Table Testing. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28:453-467.

Raychowdhury, P., 2009. Effect Of Soil Parameter Uncertainty on Seismic Demand of Low-Rise Steel Buildings on Dense Silty Sand. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 29: 1367-1378.

Raychowdhury, P., 2011. Seismic Response of Low-Rise Steel Moment-Resisting Frame (SMRF) Buildings Incorporating Nonlinear Soil–Structure Interaction (SSI). Engineering Structures, 33: 958-967.

Raychowdhury, P., Singh, P., 2012. Effect of Non-Linear Soil-Structure Interaction on Seismic Response of Low-Rise SMRF Buildings. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 11(4):541-551.

Renzi, S., Madiai, C., Vannucchi, G., 2013. A Simplified Empirical Method for Assessing Seismic Soil-Structure Interaction Effects on Ordinary Shear-Type Buildings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 55:100-107.

Rovithis, E.N., Pitilakis, K.D., Mylonakis, G.E., 2009. Seismic Analysis of Coupled Soil-Pile-Structure Systems Leading to the Definition of a Pseudo-Natural SSI Frequency. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29: 1005-1015.

Saez, E., Caballero, F.L., Razavi, A.M.F., 2013. Inelastic Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on Moment-Resisting Frame Buildings. Engineering Structures, 51:166-177.

Saranik, M., Lenoir, D., Jezequel, L., 2012. Shaking Table Test and Numerical Damage Behavior Analysis of a Steel Portal Frame with Bolted Connections. Computers and Structures, 112: 327-341.

Sayyad, S.T., Bhusare, V., Effectiveness of Base Isolator in High Rise Building for Different Soil Conditions Using FEM. International Journal of Scientific Development and Research, 1(7): 291-295.

Shafayat, B.A., Dookie, K., 2017. Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Behavior of Base-Isolated Nuclear Power Plants. International Journal of Advanced Structures & Geotechnical Engineering, 6(3): 103-113.

Shekari, M.R., 2018. A coupled BE-FE-BE study for investigating the effect of earthquake frequency content and predominant period on seismic behavior of base-isolated concrete rectangular liquid tanks. Journal of Fluids and Structures, 77: 19-35.

Soneji, B.B., Jangid, R.S., (2008). Influence of Soil–Structure Interaction on the Response of Seismically Isolated Cable-Stayed Bridge. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28:245-257.

Spyrakos, C.C., Vlassis, A.G., 2002. Effect of Soil-Structure Interaction on Seismically Isolated Bridges. Journal of Earthquake Engineering, 6(3):391-429.

Spyrakos, C.C., Koutromanos, I.A., Maniatakis, Ch. A., 2009a. Seismic Response of Base-Isolated Buildings Including Soil-Structure Interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29:658-668.

Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A., Koutromanos I.A., 2009b. Soil-Structure Interaction Effects on Base-Isolated Buildings Founded on Soil Stratum. Engineering Structures, 31: 729-737.

Stehmeyer, E.H., Rizos, D.C., 2008. Considering Dynamic Soil Structure Interaction (SSI) Effects on Seismic Isolation Retrofit Efficiency and The Importance of Natural Frequency Ratio. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28: 468-479.

Taranath, B.S., 2005. Wind and Earthquake Resistant Buildings Structural Analysis and Design. Marcel Dekker, New York, USA.

Temel, B., 1996. Dinamik Zemin-Yapi Etkileşimi Problemlerinin Sonlu-Sonsuz Elemanlar ve Laplace Dönüşüm Yöntemi ile Analizi. Ç.Ü. Doktora Tezi, Adana, 194s.

Tongaonkar, N.P, Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil–Structure Interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23: 287-302.

Tsai, C.S., Lu, P.C., Chen, W.S., Chiang, T.C., Yang, C.T., Lin, Y.C., 2008. Finite Element Formulation and Shaking Table Tests of Direction-Optimized Friction Pendulum System. Engineering Structures, 30: 2321-2329.

Turan, A., Hinchberger, S.D., Naggar, H.E., 2009. Design and Commissioning of a Laminar Soil Container for Use on Small Shaking Table. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29:404-414.

Vasdravellis, G., Valente, M., Castiglioni, C.A., 2009. Dynamic Response of Composite Frames with Different Shear Connection Degree. Journal of Constructional Steel Research, 65: 2050-2061.

Vlassis, A.G., Spyrakos, C.C., 2001. Seismically Isolated Bridge Piers on Shallow Soil Stratum with Soil-Structure Interaction. Computer and Structures, 79(32):47-61.

Wang, S.J., Chang, K.G., Hwang, J.S., Hsiao, J.Y., Lee, B.H., Hung, Y.C., 2012. Dynamic Behavior of a Building Structure Tested With Base and Mid-Story Isolation Systems. Engineering Structures, 42: 420-433.

Wang, Q., Wang, J.T., Jin, F., Chi, F.D., Zhang, C.H., 2011. Real-Time Dynamic Hybrid Testing for Soil-Structure Interaction Analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31:1690-1702.

Wilson, E.L., 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. Computers and Structures Inc. California. 423 P.

Wu, Y.M., Samalı, B., 2002. Shake Table Testing of a Base Isolated Model. Engineering Structures, 24:1203-1215.

Xue, S., Liu, Y., Li, X., 2015. Dynamic Performance Analysıs of Single-Layer Cylindrical Reticulated Shell Considering Pile-Soil-Structure Interaction. Journal Of The International Association For Shell And Spatial Structures, 56 (2):91-100.

Yerli, H. R., 1998. İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanılarak Analizi. Ç.Ü. Doktora Tezi, Adana, 244s.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında İran'ın Batı Azerbaycan eyaletinin merkezi, Urmiye'de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Urmiye'de tamamladı. 2002 yılında Urmiye Azad Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2007 yılında lisans eğitimini bitirdi ve aynı üniversitede İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında yüksek lisans unvanı ile mezun olduktan sonra, Tahran ve Urmiye'de çelik ve betonarme yapı tasarım mühendisi olarak özel sektörde çalıştı. 2012 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalı doktora programına başladı. Evli ve bir çocuk babası olan Sajjad BAYRAMI, merkez ofisi Ankara'da bulunan bir mühendislik firmasında yapı tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.