

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÜÇ EĞRİLİKLİ SÜRTÜNMELİ SARKAÇ MESNETLİ YAPILARIN DİNAMİK
DAVRANIŞINA ZEMİN EĞİLEBİLİRLİĞİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Muhammet YURDAKUL

**OCAK 2011
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÜÇ EĞRİLİKLİ SÜRTÜNMELİ SARKAÇ MESNETLİ YAPILARIN
DİNAMİK DAVRANIŞINA ZEMİN EĞİLEBİLİRLİĞİNİN ETKİSİ

İnş. Müh. Muhammet YURDAKUL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.12.2010
Tezin Savunma Tarihi : 19.01.2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Recep NİŞANCI

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Trabzon 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli Yapıların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen Hocalarım Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a, Arş. Gör. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a, Arş. Gör. Dr. D. Mehmet ÖZCAN'a ve Arş. Gör. Temel TÜRKER'e çok teşekkür ederim.

Tez jüri üyeliğinde bulunup tezin tamamlanmasında önemli katkıları olan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE ve Yrd. Doç. Dr. Recep NİŞANCI'ya şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren babama, anneme, ablalarım, kardeşlerime, yeğenlerime ve arkadaşlarıma müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, tüm desteğiyle yanımda olan eşim Solmaz YURDAKUL'a göstermiş olduğu sabırdan dolayı teşekkür eder, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Muhammet YURDAKUL
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Sismik İzolasyon Çeşitleri	9
1.3.1 Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemi	9
1.3.2. Yeni Zelanda Mesnet Sistemi	10
1.3.3. Elastik Sürtünmeli Mesnet Sistemi.....	11
1.3.4. Fransız Elektrik Mesnet Sistemi	12
1.3.5. Kayıcı Elastik Sürtünmeli Mesnet Sistemi	13
1.3.6. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemi	13
1.3.7. Sürtünmeli Mesnet Sistemi.....	14
1.3.8. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi.....	15
1.3.9. Çelik Bilyeli İzolatör	16
1.3.10. Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemleri.....	16
1.4. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Uygulamaları	21
1.4.1. Dünyadaki Uygulamalar	21
1.4.2. Ülkemizdeki Uygulamalar	24
1.5. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri	29
1.5.1. Sürtünme Katsayısı.....	34
1.6. İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri	35
1.6.1. İESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi	37

1.6.1.1.	İESS’de Kayma Durumu 1	39
1.6.1.2.	İESS’de Kayma Durumu 2	40
1.6.1.3	İESS’de Kayma Durumu 3	42
1.7.	Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri	43
1.7.1.	ÜESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi.....	46
1.7.1.1	ÜESS’de Kayma Durumu 1.....	47
1.7.1.2.	ÜESS’de Kayma Durumu 2.....	49
1.7.1.3.	ÜESS’de Kayma Durumu 3.....	51
1.7.1.4.	ÜESS’de Kayma Durumu 4.....	52
1.7.1.5.	ÜESS’de Kayma Durumu 5.....	54
1.8.	Çok Hendekli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi.....	57
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	58
2.1.	Giriş	58
2.2.	Seri Model	59
2.2.1.	ÜESS Seri Modeli İçin Formüller	61
2.3.	Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri	65
2.3.1.	Doğal Frekans ve Modların Hesabı	65
2.3.2.	Mod Süperpozisyon Yöntemi	69
2.3.3.	SAP2000’de Zaman Tanım Alanında Analiz	73
2.3.4.	SAP2000 Yapısal Analiz Programı ile Çerçeve Analizi	74
2.3.5.	SAP2000’de Kabuk Eleman (Shell Element).....	75
2.3.6.	SAP2000’de Doğrusal Olmayan Bağlantı Elemanı (Nlink Element)	76
2.4.	Zemin-Yapı Etkileşimi İçermeyen Düzlem Çerçeve Modeli	78
2.5.	Zemin-Yapı Etkileşimi İçeren Düzlem Çerçeve Modeli	79
2.6.	Yer Hareketi.....	80
2.7.	Düzlem Çerçevenin Sismik İzolasyonunda Kullanılan ÜESS Mesnedinin Mevcut Parametreleri.....	81
2.8.	Seri Modelde Kullanılan Parametreler	82
2.9.	Gülburnu Köprüsü	83
2.9.1.	Malzeme Özellikleri	85
2.9.2.	Yer Hareketi.....	86

2.9.3.	Gölburnu Köprüsü'nde Kullanılan ÜESS Mesnedinin Mevcut Parametreleri.....	88
2.9.4.	Seri Modelde Kullanılan Parametreler	88
2.9.5.	Gölburnu Köprüsü'nde Kullanılan ÜESS Mesnedinin SAP2000'de Modellenmesi	89
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	91
3.1.	Giriş	91
3.2.	Zemin-Yapı Etkileşimi İçermeyen 8 Katlı Düzlem Çerçeve Modelinden Elde Edilen Bulgular	92
3.2.1.	Periyotlar.....	92
3.2.1.1.	Periyotların İrdelenmesi.....	93
3.2.2.	Kat Yerdeğıştirmeleri, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnedinin Yerdeğıştirmesi	93
3.2.2.1.	Maksimum Kat İvmeleri, Maksimum Yerdeğıştirmeler ve ÜESS Mesnedinin Yerdeğıştirmesinin İrdelenmesi	102
3.2.3.	Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması.....	104
3.2.3.1.	Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetlerinin İrdelenmesi	107
3.2.4.	İzolatördeki Meydana Gelen Kesme Kuvveti-Yerdeğıştirme Arasındaki İlişki.....	108
3.2.4.1.	İzolatörde Meydana Gelen Kesme Kuvveti-Yerdeğıştirme Arasındaki İlişkinin İrdelenmesi.....	108
3.3.	Zemin-Yapı Etkileşimi İçeren 8 Katlı Düzlem Çerçeve İçin Elde Edilen Bulgular	109
3.3.1.	Yumuşak, Orta ve Sert Zemin Sınıfları İçin Sismik İzolasyonlu ve İzolasyonsuz Düzlem Çerçevenin Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Periyotlar	109
3.3.1.1.	Periyotların İrdelenmesi.....	110
3.3.2.	Maksimum Kat Yerdeğıştirmelerinin, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnet Sisteminin Yerdeğıştirmesi.....	110
3.3.2.1.	Maksimum Kat Yerdeğıştirmelerinin, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnet Sisteminin Yerdeğıştirmesinin İrdelenmesi	127
3.3.3.	Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri ve Eğilme Momentlerinin Karşılaştırılması.....	129

3.3.3.1.	Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının İrdelenmesi	137
3.3.4.	İzolatördeki Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi.....	138
3.3.4.1.	Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi Sonuçlarının İrdelenmesi.....	139
3.4.	Sismik İzolasyonsuz, TESS ve ÜESS Mesnedi ile Sismik İzolasyonu Yapılan Gülburnu Köprüsü'nün Analizleri Sonuçlarından Elde Edilen Bulgular	140
3.4.1.	Analizler Sonuçlarından Elde Edilen Periyotlar.....	140
3.4.1.1.	Periyotların İrdelenmesi.....	140
3.4.2.	Analizler Sonuçlarından Elde Edilen Düşey Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	141
3.4.2.1.	Analizleri Sonuçlarından Elde Edilen Düşey Yerdeğiştirmelerin İrdelenmesi	141
3.4.3.	Tabliye Boyunca Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri ve Burulma Momentlerinin Karşılaştırılması	142
3.4.3.1.	Tabliye Boyunca Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri ve Eğilme Momentleri Sonuçlarının İrdelenmesi.....	143
4.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	145
5.	KAYNAKLAR	148
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Bu tez çalışmasında, üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetli yapıların dinamik davranışına zemin eğilebilirliğinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, SAP2000 programında oluşturulan 8 katlı düzlem çerçeve modeli ve Gülburnu Köprüsü üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Yapılarda sismik izolasyon yapılmasının faydalarında biri, sismik izolasyon kullanımının yapılarda periyodu arttırmasıdır. Buna bağlı olarak yapıların depreme dayanımı artmaktadır. Diğer bir fayda ise periyodun artmasıyla birlikte depremden yapıya aktarılan ivmeler azalacaktır. Buna bağlı olarak yapıların kesit tesirlerinde azalmalar meydana gelecektir.

Yüksek lisans tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; sismik izolasyon sistemleri, bunlara ait analitik modeller ve bu yöntemlere ait formülasyonlar sunulmaktadır.

İkinci bölümde; yapılan çalışmalara yer verilmektedir. Yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetli ve ankastre mesnetli olarak modellenen 8 katlı düzlem çerçevenin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. İkinci kısımda; zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetli ve ankastre mesnetli olarak modellenen söz konusu düzlem çerçevenin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Üçüncü kısımda ise sismik izolasyonsuz, tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetlerini kullanılarak sismik izolasyonu yapılan Gülburnu Köprüsü'nde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır.

Üçüncü bölümde; analizlerden elde edilen bulgular ve irdelemeler sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sismik İzolasyon, Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnedi, Düzlem Çerçeve, Zemin-Yapı Etkileşimi, Doğrusal Olmayan Bağlantı Elemanları, Seri Model.

SUMMARY

Effect of Soil Flexibility on the Dynamic Behavior of Seismically Isolated Structures with the TCFP Bearings

In this thesis, soil flexibility effects on the dynamic behavior of the seismically isolated structures with triple concave friction pendulum bearings are examined. For this purpose, a two-dimensional and eight storey reinforced concrete building frame with and without seismic isolation bearings, and Gülburnu Highway Bridge are used for analysis in SAP2000.

The techniques used in the structures provide many advantages. Firstly, process of seismic isolation causes to increase dominant period of the structure. Therefore, resistance of structure against earthquake ground motion incredibly increases. The second advantage is that period of structure is increased so transmitted acceleration to the structure due to earthquake motion is reduced. This lead to decrease on elements forces of structure.

Four main sections are considered in this thesis. In the first section of the thesis, background of seismic isolation techniques, their analytical models and formulations of these models are given.

In this second section of the thesis, studies which done are considered. The second section of the thesis is separated into three main parts. In the first part; nonlinear time history analyses of the plane frame with isolated and non-isolated are performed. In the second part; the plane frame with and without both soil-structure interaction and triple concave friction pendulum bearings are performed. In the third part; the finite element model of Gülburnu Highway Bridge are presented. The analysis of the bridge with and without seismic isolation is performed. The single concave and the triple concave friction bearings are used for the seismic isolation of the considered bridge. Time history analysis is used for dynamic analysis.

In the third section of the thesis; results obtained from these analyses are examined.

In the fourth section of the thesis; conclusions and some suggestions related to the study are given. Lastly, references and autobiography are presented.

Key Words : Seismic isolation; triple concave friction pendulum; soil structure interaction, non-linear link elements, series model.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Jules Touaillon tarafından patenti alınan sistem.....	3
Şekil 1.2. Tabakalı kauçuk mesnet sistemi	10
Şekil 1.3. Yeni Zelanda mesnet sistemi	11
Şekil 1.4. Elastik sürtünmeli mesnet sistemi	12
Şekil 1.5. Fransız elektrik mesnet sistemi.....	12
Şekil 1.6. Kayıcı elastik sürtünmeli mesnet sistemi	13
Şekil 1.7. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet sistemi	14
Şekil 1.8. Sürtünmeli mesnet sistemi	15
Şekil 1.9. Çapraz doğrusal hareket sisteminin görünüşü	15
Şekil 1.10. ÇBİ sisteminin görünüşü	16
Şekil 1.11. Sarkaç hareketinin SSM sistemine geçişinin gösterilmesi	17
Şekil 1.12. Sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi.....	19
Şekil 1.13. Benicia–Martinez Köprüsü.....	22
Şekil 1.14. AboveNet Binası.....	23
Şekil 1.15. Yunanistan’daki LPG tankı	23
Şekil 1.16. Hermes heykeli	23
Şekil 1.17. Sakhalin 2 platformu (a) ve kullanılan SSM (b).....	24
Şekil 1.18. Eel River Köprüsünü	24
Şekil 1.19. Atatürk Hava Limanı Dış Hatlar Terminali.....	25
Şekil 1.20. Sabiha Gökçen uluslararası havalimanı terminal binası (a) ve birleşim detayı (b).....	26
Şekil 1.21. Tarabya otelinin görünümü (a) ve kolonlarına yerleştirilen SSM sistemi (b)	26
Şekil 1.22. Erzurum Devlet Hastanesi (a) ve kullanılan izolatör.....	27
Şekil 1.23. Ankara Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi (a) ve kullanılan izolatör	27
Şekil 1.24. Antalya Havaalanı’ndaki sismik izolasyon uygulaması	28
Şekil 1.25. Bolu Viyadükü’nden görünümler	28
Şekil 1.26. Gülburnu köprüsü	29

Şekil 1.27.	İzmir Aliağa tankları.....	29
Şekil 1.28.	TESS mesnet sisteminin serbest cisim diyagramı	30
Şekil 1.29.	Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnedin histeretik davranışı	32
Şekil 1.30.	Sürtünme katsayısının mesnet basıncına bağlı olarak değişimi	35
Şekil 1.31.	İESS mesnet sisteminin kesiti.....	36
Şekil 1.32.	İki eğrilikli mesnet sisteminin eşit eğrilikli yüzeyi (a) ve farklı eğrilikli yüzey (b) en kesitleri.....	36
Şekil 1.33.	Çeşitli aşamalarda İESS mesnedinin en kesiti.....	38
Şekil 1.34.	İESS mesnet sisteminin serbest cisim diyagramı	39
Şekil 1.35.	ÜESS mesnet sisteminin kesiti	44
Şekil 1.36.	ÜESS mesnet sisteminin en kesiti	44
Şekil 1.37.	ÜESS mesnet sisteminin çeşitli aşamalarda hareket durumları.....	46
Şekil 1.38.	ÇHSSM sisteminin en kesiti (a) sökülmüş hali (b) açılmış görünümü (c)	57
Şekil 2.1.	ÜESS mesnet modelini temsil eden seri modeldeki üç tane TESS mesnedi	60
Şekil 2.2.	ÜESS mesnedinin SAP2000 deki yapı-zemin etkileşim içermeyen (a) ve içeren (b) seri modeldeki gösterimleri.....	61
Şekil 2.3.	Mod süperpozisyon yöntemi.....	70
Şekil 2.4.	Mod süperpozisyon yönteminde modal koordinatlar ve çözüm.....	73
Şekil 2.5.	Dört düğüm noktalı kabuk eleman	76
Şekil 2.6.	Kabuk elemanda gerilmeler	76
Şekil 2.7.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen (Rijit zemin) 8 katlı düzlem çerçeve modeli	78
Şekil 2.8.	Zemin-yapı etkileşimi içeren 8 katlı düzlem çerçeve	80
Şekil 2.9.	17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ivme-zaman (a) ve yerdeğiştirme-zaman grafikleri (b)	81
Şekil 2.10.	Gülburnu Köprüsü	83
Şekil 2.11.	Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan TESS mesnet sistemi.(Yüksel Proje, 2007).....	84
Şekil 2.12.	Gülburnu Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları (Yüksel Proje, 2007).....	84
Şekil 2.13.	Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	85
Şekil 2.14.	13 Mart 1992 Erzincan depreminin ERZ-EW (a) ve ERZ-NS (b) bileşenlerine ait ivme zaman grafikleri.....	87

Şekil 2.15.	13 Mart 1992 Erzincan depreminin ERZ-EW (a) ve ERZ-NS (b) bileşenlerine ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri	87
Şekil 2.16.	ÜESS mesnedinin üç boyutlu seri modeli	90
Şekil 3.1.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 1. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	94
Şekil 3.2.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 2. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	94
Şekil 3.3.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 3. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	95
Şekil 3.4.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 4. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	95
Şekil 3.5.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 5. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	96
Şekil 3.6.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 6. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	96
Şekil 3.7.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 7. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	97
Şekil 3.8.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 8. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	97
Şekil 3.9.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 1. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	98
Şekil 3.10.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 2. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	98
Şekil 3.11.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 3. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	99
Şekil 3.12.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 4. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	99

Şekil 3.13.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 5. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	100
Şekil 3.14.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 6. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	100
Şekil 3.15.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 7. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	101
Şekil 3.16.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 8. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması	101
Şekil 3.17.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin yerdeğiştirmesi	102
Şekil 3.18.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen normal kuvvetlerinin karşılaştırılması	105
Şekil 3.19.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve ankastre mesnetli düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	105
Şekil 3.20.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen eğilme momentlerinin karşılaştırılması	106
Şekil 3.21.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	106
Şekil 3.22.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnedinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.....	108
Şekil 3.23.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 3.24.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 3.25.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	112
Şekil 3.26.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	112

Şekil 3.27.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	113
Şekil 3.28.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	113
Şekil 3.29.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 3.30.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 3.31.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.32.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.33.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	116
Şekil 3.34.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	116
Şekil 3.35.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 3.36.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 3.37.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	118
Şekil 3.38.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	118
Şekil 3.39.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	119
Şekil 3.40.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	119

Şekil 3.41.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	120
Şekil 3.42.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	120
Şekil 3.43.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	121
Şekil 3.44.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	121
Şekil 3.45.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 3.46.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 3.47.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	123
Şekil 3.48.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	123
Şekil 3.49.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 3.50.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 3.51.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	125
Şekil 3.52.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	125
Şekil 3.53.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	126
Şekil 3.54.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması.....	126

Şekil 3.55.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren üç zemin sınıfı için düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnetlerinin yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 3.56.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki normal kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	130
Şekil 3.57.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki normal kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 3.58.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	132
Şekil 3.59.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	133
Şekil 3.60.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki eğilme momentlerinin karşılaştırılması.....	134
Şekil 3.61.	Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki eğilme momentlerini karşılaştırılması.....	135
Şekil 3.62.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 3.63.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 3.64.	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi.....	138
Şekil 3.65.	Yumuşak zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi.....	138
Şekil 3.66.	Orta zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi.....	139
Şekil 3.67.	Sert zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi.....	139
Şekil 3.68.	Gölburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnedi kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi düşey yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.....	141
Şekil 3.69.	Gölburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi normal kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	142

- Şekil 3.70. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması 143
- Şekil 3.71. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizler sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi burulma momentlerinin karşılaştırılması 143

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Durum 1-5'deki ÜESS mesnet sisteminin davranışı	56
Tablo 2.1. Düzlem çerçevenin kesit ve malzeme özellikleri i	79
Tablo 2.2. Temel zeminin özellikleri	80
Tablo 2.3. ÜESS mesnedinin parametreleri.....	82
Tablo 2.4. Düzlem çerçevedeki seri modelde kullanılan parametreler.....	82
Tablo 2.5. Gülburnu Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	86
Tablo 2.6. Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan ÜESS mesnet parametreleri.....	88
Tablo 2.7. Gülburnu Köprüsü'ndeki seri modelde kullanılan parametreler	88
Tablo 3.1.. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları	92
Tablo 3.2. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin maksimum kat ivmeleri	102
Tablo 3.3. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin maksimum kat yerdeğiştirmeleri	103
Tablo 3.4. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum normal kuvvetleri	107
Tablo 3.5. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum kesme kuvvetleri	107
Tablo 3.6. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum eğilme momentleri.....	108
Tablo 3.7. Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin üç ayrı zemin sınıfı için yapılan analiz sonuçlarından elde edilen periyotları	109
Tablo 3.8. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen maksimum kat ivmeleri.....	128
Tablo 3.9. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen maksimum kat yatay yerdeğiştirmeleri	128

Tablo 3.10. Gülburnu Köprüsü'nde sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnedi kullanarak yapılan dinamik analizlerden elde edilen periyotlar..... 140

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Kayıcının alanı
a	Sürtünme katsayısının maksimum ve minimum değerleri arasında geçişi kontrol eden katsayı
\bar{a}	Seri modelde sürtünme katsayısının maksimum ve minimum değerleri arasında geçişi kontrol eden katsayı
a_{maks}	Maksimum ivme
d	Nominal yerdeğiştirme kapasitesi
h	Eksen noktası ile küresel yüzeyin arasındaki dik mesafe
g	Yerçekimi ivmesi
n	Yapısal sistemin serbestlik derecesi
P	Sürtünmeli Sarkaç mesnet basıncı
R	Sürtünmeli sarkaç mesnedinin küresel yüzeyinin eğrilik yarıçapı
s	Saniye
u	Yerdeğiştirme
W	Mesnedin taşıdığı yük
B_{eff}	Kayan yüzeydeki sürtünme ile oluşan sönüm
\dot{D}	Mesnedin kayma hızı
\bar{d}_i	Seri modeldeki i. boşluk elemanın yerdeğiştirmesi
F_f	Kayma ara yüzeyi boyunca meydana gelen sürtünme kuvveti
\bar{F}_f	Seri modeldeki sürtünme kuvveti
f_{max}	Maksimum sürtünme katsayısı
f_{max0}	Mesnet basıncının yaklaşık olarak 0 olması durumunda sürtünme katsayısını
f_{maxp}	Mesnet basıncına bağlı sürtünme katsayısı
f_{min}	Minimum sürtünme katsayısı
F_{dri}	i.kayan yüzeye uygulanan yatay kuvvet
c_b	Sönüm

C_r	r. Genelleştirilmiş sönüm
$q(t)$	Modal koordinatlar
$q_r(t)$	r. titreşim moduna ait modal koordinatlar
m_b	Kütle
M_r	r. Genelleştirilmiş kütle
k_b	Rijitlik
K_h	Sarkacın rijitliği
K_r	r. Genelleştirilmiş rijitlik
P_r	r. Genelleştirilmiş kuvvet
R_{eff}	Sürtünmeli sarmacın efektif eğrilik yarıçapı
$\bar{R}_{eff i}$	Seri modelde i. elemanın etkili eğrilik yarıçapı
t_f	Mafsallı kayıcının küresel yüzeyi boyunca olan sürtünme çekmeleri
S	Kayma ara yüzleri boyunca uygulanan normal basınçtan meydana gelen kuvvet
V_b	Sürtünmeli sarkaç mesnedinin yatay yerdeğiştirmesi
V_{maks}	Maksimum taban kesme kuvveti
μ	Sürtünme katsayısı
$\bar{\mu}_i$	Yüksek hızdaki hareket için i. yüzeydeki sürtünme katsayısı
u^*	Kayma durumları arasında oluşan yerdeğiştirme
u_{dri}	i. yüzeydeki toplam yerdeğiştirme
$\mu(\dot{u})$	Anlık kayma hızının bir fonksiyonu
ξ	Sönüm sabiti
α	Faz açısı
δ_v	Mesnetin düşey yerdeğiştirmesi
ε	Maksimum sürtünme katsayısının yüksek ve düşük basınçlar arasındaki geçişi kontrol eden bir katsayı
ω	Doğal Frekans
ω_n	Doğal açısal frekans
ω_r	r. titreşim moduna karşılık gelen açısal frekans
$[M]$	Sistemin kütle matrisi

[C]	Sistemin sönüm matrisi
[K]	Sistemin rijitlik matrisi
[K _L]	Doğrusal olmayan bağlantı elemanları hariç doğrusal elastik elemanların rijitlik matrisi
[K _N]	Bütün doğrusal olmayan serbestlik dereceleri için doğrusal efektif rijitlik matrisi
{U}	Sistemin yer değiştirme vektörü
{ \dot{U} }	Sistemin hız vektörü
{ \ddot{U} }	Sistemin ivme vektörü
{P}	Dış yük vektörüdür
{P _N }	Doğrusal olmayan bağlantı elemanlarındaki doğrusal olmayan serbestlik derecesinden doğan yük vektörü
{q}	Modal koordinatlar
{ ϕ }	Hareketin genlik vektörü
[Φ]	Normalleştirilmiş modal matris
{ Φ } _r	Normalleştirilmiş mod
[I]	Birim matris
π	Sabit sayı
θ	Dönme açısı
λ	Öz değer vektör
BE	Boşluk eleman
ÇBİ	Çelik bilyeli izolatör
ÇDH	Çapraz doğrusal hareket
ÇHSSM	Çok hendekli sürtünmeli sarkaç mesnet
ESM	Elastik sürtünmeli mesnet
F	Dış kuvvet
FEM	Fransız elastik mesnet sistemi
İESS	İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç
KESM	Kayıcı elastik mesnet sistemi
LDRB	Düşük sönümleyicili kauçuk mesnetler

LRB	Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet
RK	Rijit kiriş
RKE	Rijit kiriş eleman
T	Periyot
TESS	Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç
TKM	Tabakalı kauçuk mesnet sistemi
TSD	Tek serbestlik derecesi
SEM	Sonlu eleman modeli
SMS	Sürtünmeli mesnet sistemi
SSM	Sürtünmeli sarkaç mesnedi
ÜESS	Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç
YSKM	Yüksek sönümlü kauçuk mesnet
YZM	Yeni Zelanda mesnet sistemi

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yer küresinde meydana gelen ve önüne geçilemeyen doğal afetlerden biri olan depremin ne zaman meydana geleceği günümüz teknolojisi ile henüz tam olarak kestirilememektedir. Aynı şekilde, nerede ve hangi büyüklükte gerçekleşeceği de tahmin edilememektedir. Deprem meydana geldiğinde can ve mal kayıplarına sebep olabileceği bilinen bir gerçektir. Deprem ve depremin yapıyı nasıl etkilediği hakkında bilgiler arttıkça can ve mal kayıplarını önlemek amacıyla depreme daha dayanıklı yapılar yapılabilir. Bu nedenle depremin arzu edilmeyen bu etkisini azaltmak için farklı yöntemleri geliştirme ihtiyacı duyulmuştur.

Yapılan araştırmalar sonucunda zemin–yapı arasındaki etkileşimin azaltılmasıyla depremlerin yapılar üzerindeki etkilerinin azaltılabileceği anlaşılmıştır. Bu amaçla, zemin ve yapıyı kısmen birbirinden ayıran deprem izolatörleri geliştirilmiştir. Yapıyı zeminden ayırmak amacıyla kullanılan izolasyon teknikleri deprem hareketinin yapılar üzerindeki etkilerini oldukça azaltabilmektedir.

Son yıllarda depreme karşı kullanılan izolasyon sistemleri deprem mühendisliği alanında kabul edilebilir bir teknik olmuştur. Binaların, köprülerin ve önemli kimyasal sıvı depoları gibi yapıların depreme karşı dayanımını arttırmak amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Deprem izolasyon sistemlerinin kullanımıyla birlikte yapıların periyotları artmaktadır. Bu durum genellikle depremden dolayı yapıya aktarılan ivmenin azalmasına neden olmaktadır. Böylece yapıda oluşan tepki kuvvetleri de azalmaktadır. Diğer bir fayda ise; yerdeğiştirmeler daha çok deprem izolatörlerinde meydana gelmekte ve üst yapı rölatif olarak rijit kalarak, yapının depreme karşı dayanımını oldukça artırabilmektedir.

Deprem sırasında yapının periyodu ile zeminin periyodunun çakışması durumda rezonans olayı gerçekleşir. Rezonans olayı ile birlikte depremin hasarı beklenenden çok daha fazla olmaktadır. Genellikle uzun periyotlu yapılar kısa periyotlu zeminler üzerine, kısa periyotlu yapılar ise uzun periyotlu zeminler üzerine inşa edilmesi, depreme daha dayanıklı yapı tasarımı sağlamaktadır (Şengel vd., 2009). Depremden kaynaklanan ve yapıya etki eden enerji, ya ısıya dönüşür ya da yapı tarafından kinetik veya potansiyel enerjiye dönüştürülür.

Geleneksel yöntemler, yapının deprem yükü taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini, stabilitesini ve elastik ötesi şekil değiştirmelerini artırarak, depremden gelen enerjileri tüketebilecek güçte taşıyıcı sistemi güçlendirmek veya iyileştirmek olarak uygulanmaktadır. Bunlara alternatif olarak geliştirilen sismik izolasyon yöntemleri; yapının rijitliğini azaltmak, periyodunu ve sönümünü artırarak yapıya gelen deprem kuvvetlerini küçültüp şiddetli depremlerde yapıya gelen depremin etkisini en aza indirmek için uygulanmaktadır. Böylece yapının maruz kaldığı deprem enerjisi azalarak yapı depreme karşı daha dayanıklı olabilmektedir. Uygulanan sismik izolasyon sistemleri, yapının temeli ve alt kolonlar arasına yerleştirilen düşey yönde rijit yatay yönde esnek olan mesnetlerdir. Bu mesnetler, izolasyon sistemleri veya izolatörler olarak tanımlanır. Sismik izolasyon sistemleri, depreme karşı dayanma kapasitesini artırmak yerine yapıya gelen sismik enerjiyi azaltma ilkesine dayanmaktadır. Geliştirilen bu yeni uygulamanın doğru hesaplanması ve uygulamada doğru olarak montajı yapıldığı durumda, yapı şiddetli depremlere maruz kaldığında yapının rijit davranış göstermesine ve elastik sınırlar içinde kalmasına yol açar. Pekgökgöz vd. (2007), sismik izolasyon sistemlerinin yapıların depreme karşı dayanıklı olması için geliştirilmiş en etkili yöntemlerden biri olduğunu vurgulamıştır.

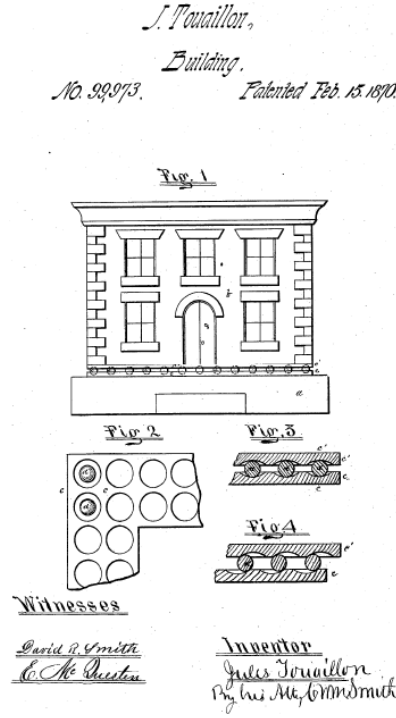
1.2 Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Sismik izolasyon sistemleri, depreme dayanıklı yapı tasarımları için etkili bir tekniktir. Taban izolasyonunda esnek bir tabaka veya izolatör bu seviyede göreceli yerdeğiştirmelere müsaade edilmesi için yapı ile temeli arasına yerleştirilmiştir. İzolatör esnek olduğundan periyodu yapının periyoduna oranla nispeten daha uzundur. İzolatörün periyodu, izolatörlü yapının periyoduna hakim olmaktadır (Murnal ve Sinha, 2004).

Yapılar için bilinen patenti alınmış ilk sismik izolasyon sistemi Jules Touaillon tarafından Amerika'da 1870 yılında yapılmıştır (Fenz ve Constantinou, 2006). Bu sistem, bir çift içbükey yüzeyde yuvarlanan küre şeklinde bir mesnettir (Şekil 1.1). Patenti alındığından beri yaklaşık 140 yıldır sismik izolasyon kavramında bir gelişme olmamıştır. Bu nedenle sismik izolasyon sisteminin verdiği olanaklardan faydalanılamamıştır. Kayıcı bir sismik izolasyon sistemi 1909 yılında İngiltere'de bir tıp doktoru olan Calantarients tarafından kullanılmıştır. Bu kayıcı sistemde, temel ile yapıyı ayıran malzeme olarak kum, pudra ve mika kullanılmıştır. Böylelikle yapının yatay yükler altında kayacağı ve üst

yapıya aktarılan yüklerin azalacağı düşünülmüştür. Bu sismik izolasyon sistemi, yapıldığı dönemde patenti alınarak boru hatlarında uygulanmıştır (Ayhan, 2006).

1908 yılında 160,000 kişinin ölümüne sebep olan Messimo-Reggio depreminden sonra İtalya hükümeti tarafından atanan komisyon yapıların depreme dayanıklı olması için



Şekil 1.1. Jules Touaillon tarafından patenti alınan sistem

iki farklı yaklaşım sunmuştur. Bunlardan biri, yapı yüksekliklerini sınırlandırılması ve yatay kuvvetler etkisinde ankastre mesnetli tasarımlar yapılmasıdır. Diğeri ise, binaların temelini kum tabakası ile zeminden ayırmak veya binanın yatay yönde hareketine olanak sağlamak için rulman koymak idi. Bu yaklaşımlardan ilki kabul edilmiş ve uygulanmıştır.

1921 yılında Tokyo'da Imperial Hotel'in temelinde, sismik izolasyon fikrini ilk uygulayan Wright olmuştur. Yumuşak ve çamurlu zemin tabakasını sık aralıklarla yerleştirdiği kazıklarla daha aşağıda yeterince iyi olan sert zemin tabakası ile birleştirmiştir. Bu uygulamadan dolayı olsa gerek Imperial Hotel, 1923 Tokyo depreminden sonra ayakta kalabilen ender yapılardan biri olmuştur.

Martel (1929), ilk depreme karşı güvenliği arttırmak fikrilerden biri olan birinci katın esnek yapılma fikrini ileri sürmüştür (Ayhan, 2006). 1935 ve 1938 yıllarında bu fikir üzerinde çalışılmıştır.

Birinci katın esnek yapılması zor olduğundan sismik izolasyon sistemlerin yapılması üzerinde durulmuştur. Deprem hareketinin yapıya gelişigüzel geldiği göz önüne alındığından dolayı bu temel mesnet sistemlerinin yaygın olarak kullanılması fikri önemini kaybetmiştir. Bunun yerine her yönde veya iki yönde hareket edebilen mesnetleri kullanma fikri ön plana çıkmıştır (Ayhan, 2006).

Davranış bakımından izolatörler iki büyük gruba ayrılır. Bunlar kauçuk ve sürtünme özelliklerini kullanan izolatörlerdir. Bu izolatör türlerinden biri olan kauçuk mesnetler, yapıların sismik izolasyonunda ilk defa Makedonya'nın Üsküp kentinde 1969 yılında tamamlanmış 3 katlı betonarme bir ilköğretim binasında kullanılmıştır. Mesnet sistemi olarak doğal kauçuk bloklardan faydalanılmıştır. Bu yıllarda kauçuk içine çelik plakalar yerleştirilmediğinden düşey yönde istenilen rijitlik elde edilememiştir. Bunu yanı sıra, mesnette yanlara doğru şişmelerde görülmüştür. Bunun sonucu olarak bina depremin etkisiyle deprem sırasında sağa sola veya ileri geri hareket etmiş ve yukarı doğru sıçramıştır. Kauçuk mesnet arasına çelik levhalar koyarak yukarıda bahsedilen olumsuz durumların önüne geçilmiştir (Ateş ve Dumanoğlu 2003).

Geçen zaman içinde üretimi diğer izolasyon sistemlerine göre daha kolay ve dayanıklı olan sürtünmeli sarkaç mesnet (SSM) sistemleri geliştirilmiş ve testleri yapılmıştır. Mokha vd. (1996), SSM sistemleri var olan yapıların güçlendirilmesi ile birlikte yeni binalar, köprüler ve endüstriyel fabrikaların sismik izolasyonu için yaygın olarak kullanılan sistem olduğunu vurgulamışlardır.

SSM sistemi sarkaç prensibine göre çalışır. Bu sistem uzun ömürlü ve çevresel kirlenmelere karşı korunaklıdır. SSM sistemi mevcut ve yeni yapıların sismik direncinin artması yönünde etkili olup ve pratiklik sunmaktadır (Zayas, 1990). SSM sisteminde arzu edilen sismik özelliklere ulaşmak için SSM sisteminin taşıdığı ağırlıktan ve geometrisinden yararlanır. Sismik izolasyon yapının doğal periyodunun değişmesiyle gerçekleştirilir. Doğal periyot değişimi, kullanılan SSM sisteminin eğrilik yarıçapının değiştirilmesiyle elde edilir.

Zayas, Low and Mahin (1987), sismik izolasyon aygıtlarını 150 den fazla deprem simülasyonu ve deprem şartları altında test etmişlerdir (Zayas, 1990).

Constantinou vd. (1993), köprülerde kullanılan SSM sisteminin davranışlarını deneysel olarak elde etmişlerdir. Deprem simülasyon testlerini SSM'i kullanarak izolasyonu yapılan bir köprü modeline bağlı olarak yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, sismik izolasyonlu köprünün deprem dayanım kapasitesinin arttığını

gözlemişlerdir. Sistemin davranışını tahmin etmek amacıyla kullandıkları analitik yöntemlerden elde edilen sonuçların deneysel çalışmayla oldukça benzer olduğunu rapor etmişlerdir.

Ateş ve Dumanoglu (2003), zemin esnekliğinin taban izolasyonlu binaların dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla SSM sistemi ile taban izolasyonu yapılan iki boyutlu 7 katlı düzlem çerçeve sisteminin dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu dinamik analizlerde; 18 Mayıs 1940 El-Centro depreminin kuzey-güney bileşeni ve 13 Mart 1992 Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni kullanılmışlardır. Sonuç olarak, geleneksel ankastre mesnetli çerçeve modellerinde zemin eğilebilirliğinin etkisi önemli olurken, taban izolasyonu yapılan çerçeve modellerinde zemin eğilebilirliği etkisinin önemli değişimlere neden olmadığını göstermişlerdir.

Ateş vd. (2004), SSM sistemi ile taban izolasyonu yapılan üç açıklıklı bir köprü modelini ele almışlardır. Taban izolasyonlu ve taban izolasyonsuz köprü modellerinin deprem analizlerinden elde edilen periyotları, yerdeğiştirmeleri, ivmeleri ve kesme kuvvetleri karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda izolasyonlu köprünün periyotlarının izolasyonsuza göre fark edilir derecede büyüdüğü, ivme ve taban kesme kuvvetlerinin ise fark edilir derecede azaldıklarını yaptıkları analiz sonuçlarından elde etmişlerdir.

Türker (2005), sismik izolasyon yöntemi geleneksel olarak uygulanan yaklaşımlara kıyasla depreme karşı daha dayanıklı ve etkili bir uygulama olduğunu belirtmiştir.

Pekgökgöz vd. (2007), birinci derece deprem bölgesinde yer alan 6 katlı betonarme bir konut binayı taban izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak yapılması durumları için maliyet analizi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda sismik izolasyon uygulanan binanın izolasyonsuz binaya göre maliyeti % 40-45 civarında arttığını göstermişlerdir. Ancak, depremden sonra hastaneler, yollar, köprüler, nükleer güç santralleri, önemli kimyasal sıvı depoları, okullar ve müzeler gibi önem arz eden ve deprem sonrası hizmet etmesi gereken yapıların deprem sonrası kullanılabilirliği göz önüne alınınca artan maliyet göz ardı edilebilir.

Kim ve Yun (2007), basit bir köprü modeli üzerinde farklı sürtünme katsayılarına ve farklı eğrisel içbükey yüzeylere sahip iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç (İESS) mesnedi kullanarak köprünün ayaklarındaki kesme kuvvetlerindeki azalmaları araştırmışlardır.

Fenz ve Constantinou (2006), aynı ve farklı sürtünme katsayılarına ve eğrilik yarıçaplarına sahip İESS mesnet sistemlerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma

sonucunda, bir yüzeyi düşük sürtünme ve küçük etkili yarıçap diğer yüzeyi ise daha yüksek sürtünme ve daha büyük etkili yarıçapa sahip olan İESS mesnet sistemleri az şiddetli deprem titreşimlerinde daha iyi yeniden merkezlenme gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte şiddetli depremler olması durumunda ise İESS mesnet sistemleri önemli derecede esneklik ve enerji emme kabiliyetlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Malekzadeh ve Taghikhany (2010), İESS ve tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TESS) mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılmış binanın tepkilerini karşılaştırmışlardır. Farklı şiddetlerdeki deprem kayıtlarını kullanarak doğrusal olmayan dinamik analizler yapmışlardır.

Soneji ve Jangid (2007), şiddetli yer hareketine maruz kalan kablolu köprülerin korunmasında pasif karma izolasyon sistemlerin etkilerini araştırmışlar. Karma izolasyon sistemi, viskoz sıvı sönüm ile birlikte kayma ve kauçuk izolasyon sistemlerinin kombinasyonundan oluşmaktadır. Illinois'te Quincy Bay-view Köprüsünün basitleştirilmiş bir modelinin sismik tepkisi, gerçek deprem yer hareketinin iki yatay bileşeni altında araştırılmıştır. Viskoz sıvı sönüm, kauçuk ve karma izolasyon sistemleriyle birlikte pasif bir enerji dağıtma aracı olarak kullanılmıştır. İzolasyonlu kablolu köprünün deprem davranışında viskoz sıvı sönümünün doğrusal olmayan etkileri, farklı hız değerleri ve sönüm katsayıları dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda viskoz sıvı sönümün, sismik izolasyonlu kablolu köprünün deprem davranışını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Ayrıca doğrusal olmayan viskoz sönümün, maksimum izolatör yerdeğiştirmesinin kontrolünde daha etkin olduğu da görülmüştür.

Purnachandra ve Jangid (2008), farklı izolasyon sistemleriyle kablolu köprünün deprem tepkilerini araştırmışlardır. Seçilen izolasyon sistemleri yüksek sönümlü kauçuk mesnet, kurşunlu kauçuk mesnet, sürtünmeli sarkaç sistemi ve esnek sürtünmeli sismik izolasyon sistemlerinden oluşmaktadır. Bütün mesnetlerde aynı anda hareket eden boyuna yönde yer hareketi uygulanmıştır. Köprünün deprem davranışını Newmark'ın adım adım integrasyon yöntemi ile köprünün temel hareket denklemini çözerek elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca izolatör parametrelerinin çeşitliliğinin etkinliği araştırılmıştır. Devrilme momenti, taban kesme kuvvetinde önemli azalmalar olduğu ve diğer dinamik tepkiler sismik izolatörler kullanılarak kontrol altına alındığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, esnek sürtünmeli taban izolatör ve kurşunlu kauçuk mesnetlerin performansı ve yüksek sönümlü kauçuk mesnet ve sürtünmeli sarkaç mesnetlerin performansından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Üstelik yüksek sönümlü kauçuk

mesnedin ve kurşunlu kauçuk mesnedin sönüm oranındaki artış, söz konusu mesnetlerin taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirmelerini azalttığı sonucuna varılmıştır. Yapıdaki izolasyon periyodu, seçilen yer hareketinin türünün yanı sıra izolatörlere bağlı olduğu belirlenmiştir.

Soneji ve Jangid (2008), iki yönde deprem etkisine maruz kablolu köprülerin deprem davranışında zemin-yapı etkileşiminin etkileri araştırmışlardır. Köprü tabliyesinde geleneksel yüksek sönümlü kauçuk mesnetler kullanılarak kulelerden itibaren sismik izolasyon yapılmıştır. Yumuşak, orta ve sert zemin olmak üzere üç çeşit zemin dikkate alınmıştır. Kazık- zemin etkileşimi, zeminin davranışını modellemek için kullanılan Bouc-Wen modeli ve paralel olarak yerleştirilmiş viskoz sönümleyiciler ve doğrusal olmayan yaylar kullanılarak Winkler temel modeli kullanılarak idealleştirilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde yumuşak zemin durumu için, zemin-yapı etkileşimleri ihmal edilmesi durumunda mesnet yerdeğiştirmelerinin gerçek değerinin altında olabileceğini belirlemişlerdir. Ayrıca, özellikle zemin yumuşak ve kuleler çok rijit olduğu zaman zemin-yapı etkilerinin dâhil edilmesi sismik izolasyonlu kablolu köprülerin etkin tasarımı için önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Faramarzi ve Montazar (2009), İESS mesnet sistemi kullanılan, depremin düşey bileşeninin etki ettiği üç boyutlu tek katlı bir binada sismik izolasyon sisteminin yerdeğiştirme kapasitesini ve taban kesme kuvvetlerini incelemişlerdir.

Yurdakul ve Ateş (2010), üç eğrilikli sürtümlü sarkaç mesnedi kullanarak sismik izolasyonlu ve sismik izolasyonsuz 8 katlı düzlem çerçevenin dinamik tepkilerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları analizlerden elde edilen sonuçlarda, kesit tesirlerinde, rölatif kat yatay yerdeğiştirmelerinde ve taban kesme kuvvetlerinde sismik izolasyonsuz duruma oranla azalmaların olduğunu tespit etmişlerdir.

Hyakuda vd., (2001), Japonya'da İESS mesnet sistemi ile izolasyonu yapılmış bir binanın tepkilerini ele almışlardır. Bu çalışmada, kullanılan mesnet sistemi mafsallı olmadığından, eşit sürtünme ve eşit etkili eğrilik yarıçaplı alt ve üst içbükey yüzeylerde farklı yönlerde hareket olmamıştır. Dolayısıyla, mesnet aşırı aşınmalara maruz kalmıştır.

Vlassis ve Spyraeos (2001), zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak sismik izolasyonlu bir köprünün sönümünü arttırma ve taban kesme kuvvetlerini azaltmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada güncel köprü tasarım kurallarını göz önüne almışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; zemin-yapı etkileşiminin önemli azalmalara neden olduğuna ulaşmışlardır.

Spyrakos ve Vlassis (2002), sismik izolasyonlu köprü tasarımlarında zemin yapı etkileşiminin dahil edilmesi gereken durumlarını belirlemişler ve zemin-yapı etkileşiminin güvenlik seviyesini artırma ve maliyeti düşürme gibi avantajlarından yararlanmışlardır.

Tongaonkar ve Jangid (2003), zemin yapı etkileşiminin kauçuk mesnetli üç açıklıklı köprünün tepkilerini incelemişlerdir. Kazıkların etrafını çevreleyen zeminin sismik izolasyonlu köprünün tepkisi üzerinde önemli etkisi olduğunu ve zemin-yapı etkileşimi hesaba katılmadığında belirli şartlar altında köprü ayağındaki mesnet yerdeğiştirmelerinin ihmal edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Tsai vd. (2004a), yaptıkları bir çalışmada, zemin yapı etkileşimi dikkate alınarak SSM sistemli yapıların analizleri sonuçlarında, yerdeğiştirmelerde ve kesme kuvvetlerinde farklılıklar olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada SSM sistemi ile izole dilmiş yapılarda zemin ortamının esnekliğini ve ırsal sönümün dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda; zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında yerdeğiştirmelerin ve kesme kuvvetlerinin zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmadığı duruma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Dicleli vd. (2005), zemin yapı etkileşimi etkilerinin sismik izolasyonlu köprülerinin deprem davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Rijit zemin üzerine inşa edilen hafif ve ağır yapılar ile sismik izoasyonlu köprülerin sismik analizinde zemin yapı etkileşimi etkilerinin ihmal edilebileceği analiz sonuçlarından anlaşıldığını bildirmişlerdir. Ancak, zemin-yapı etkileşimi, temel zeminin rijitliği ne olurda olsun ağır altyapı ve hafif üst yapı köprüler için dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Yumuşak zemin durumlarında köprünün tipi ne olursa olsun zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması gerekliliği bildirilmiştir.

Soneji ve Jangid (2006), yüksek sönümlü kauçuk izolatör, kurşun çekirdekli izolatör ve sürtünmeli sarkaç tipi izolatörleri kullanarak kablolu köprülerin sismik izolasyonları üzerinde çalışmışlardır. Newmark metodu kullanarak köprü tabliyesi boyunca dört farklı deprem ivme kaydı kullanarak köprü için zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanmışlardır. Köprünün sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İzolasyon kullanılan köprünün kule taban kesme kuvvetlerinde ve ivmelerinde azalma olduğunu gözlemlenmiştir.

Constantinou ve Kneifati (1988), sismik izolasyonlu yapının dinamik analizlerini, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada harmonik bir yer hareketine maruz kalan ve sert kayayı örten elastik toprak tabakası üzerine

kurulmuş çok katlı binaların tepkisine zemin yapı etkileşiminin nasıl etki ettiğini araştırılmıştır. Araştırma sonucunda zemin yapı etkileşimi etkileri küçük kütle oranlı az katlı yapılar (yumuşak zemin tabakası üzerindeki birkaç katlı yapılar) için önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Spyrakos vd., (2009b), zemin yapı etkileşimini dikkate alarak SSM sistemi ile sismik izolasyonu yapılmış yapıların tepkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, frekansın zemin rijitliği ve sönüm katsayılarından bağımsız olduğu düşünülerek frekans etki alanındaki hareket denklemlerini çıkartmışlardır.

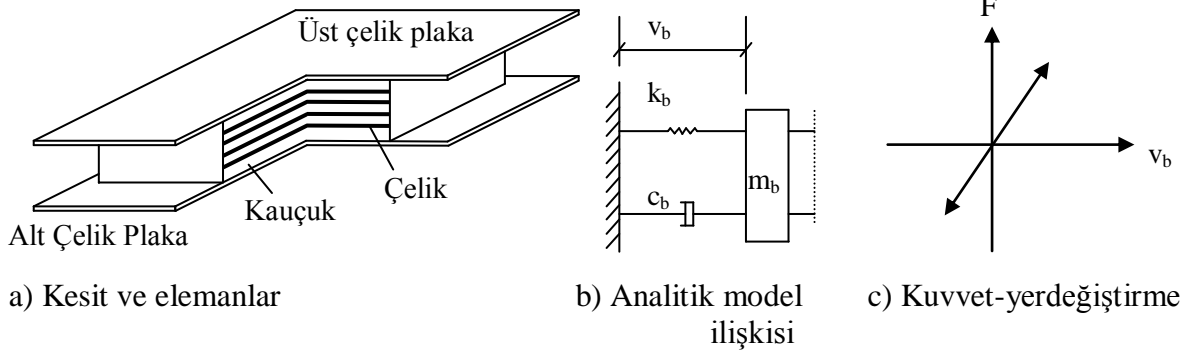
1.3. Sismik İzolasyon Çeşitleri

Sismik izolasyon sistemleri, yapının temeli ve kolonları arasına yerleştirilmiş, yatay yönde esnek düşey yönde rijit olan taşıyıcılar olarak tanımlanır. Bu taşıyıcılara izolasyon aletleri yada izolasyon sistemleri denir. Uygulamada kullanılan sismik izolasyon sistemleri kauçuk ve sürtünmeye dayalı izolatörler olarak bilinmektedir. Bu sistemler aşağıda açıklanmıştır.

1.3.1. Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemi

Jangid ve Datta'ya (1995) göre, tabakalı kauçuk mesnet sistemi (TKM), sismik izolasyon sistemlerinden en fazla tercih edilen sismik izolasyon çeşididir. Bu sistemin temel bileşenleri tabakalar halinde kullanılan çelik ve kauçuk plakalardır. Sönümün ve rijitliğin paralel etkileri bu sistemin en önemli özelliğidir. Genellikle TKM sistemi yatayda esnek hareket edebilen ve düşeyde rijit olan yüksek sönüm gösteren sismik izolasyon sistemidir. Tracis'e (1984) göre, bu sistemin doğal frekans ve sönüm sabiti olmak üzere iki karakteristik özelliği vardır. Tracis (1984) tarafından yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda, sistemin sönüm sabiti mesnedin şekil değiştirmesine bağlıdır. Şekil değiştirme %2 olduğunda sönüm oranı 0,18 ve şekil değiştirme %50 olduğunda sönüm oranı 0,10 olduğu kabul edilmiştir. TKM sisteminde öngörülen değerler: sismik izolasyonlu yapının periyodu 2 s olduğunda doğal frekans π rad/s, sönüm 0,10 dir. TKM sistemi, değişen şartlar altında taşıyıcı olmayan sistemleri etkili bir şekilde koruduğu gözlemlenmiştir (Fan,

F.G. ve Ahmadi, G., 1990). TKM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları, analitik modeli ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

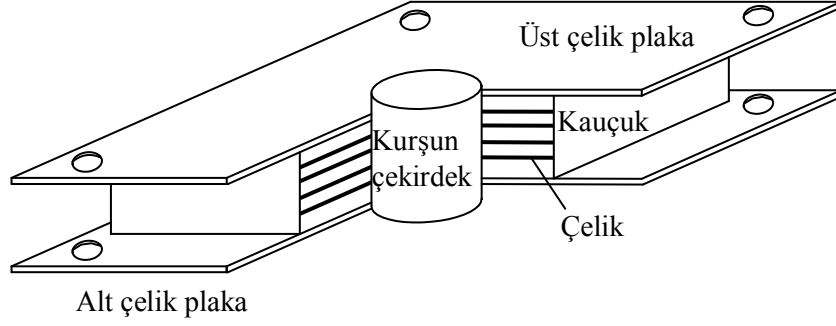


Şekil 1.2. Tabakalı kauçuk mesnet sistemi

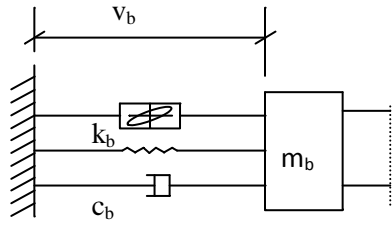
Burada, F kuvvet; V_b sürtünmeli sarkaç mesnedinin yatay yerdeğiştirmesi; k_b rijitlik; c_b sönüm ve m_b kütledir.

1.3.2. Yeni Zelanda Mesnet Sistemi

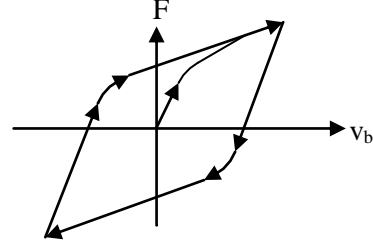
İlk olarak 1975 yılında Yeni Zelanda’da kullanmaya başlandığından bu sisteme Yeni Zelanda Mesnet (YZM) sistemi denilmektedir. TKM sisteminin benzeri olan Yeni Zelanda Mesnet sisteminin farkı; merkezine enerji dağılımlında ilave bir rijitlik sağlamak amacıyla yerleştirilen kurşun çekirdek kullanılmasıdır. Kurşun çekirdeğin deprem esnasında oluşan enerjiyi emebilme kapasitesi, izolatörün yatay yönde yerdeğiştirme kapasitesini azaltır. YZM sistemi prensip olarak histeretik söndürücü olarak çalışmaktadır (Skinner vd., 1975). Histeretik söndürücü aletin kuvvet-yerdeğiştirme özelliği gerçeğe yakın olarak doğrusal olmayan diferansiyel denklemler kullanarak elde edilir (Constantinou ve Tadjbakhsh, 1985). Bu sistemin en önemli sakıncası depremden dolayı oluşan güçlü yer hareketinden dolayı kurşun çekirdeğin zarar gördüğünün tespit edilip edilememesidir. Bu sistem Yeni Zelanda, Amerika ve Japonya’da yaygın olarak kullanılmaktadır. YZM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları, analitik modeli ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.3’te gösterilmiştir.



a) Kesit ve elemanlar



b) Analitik model

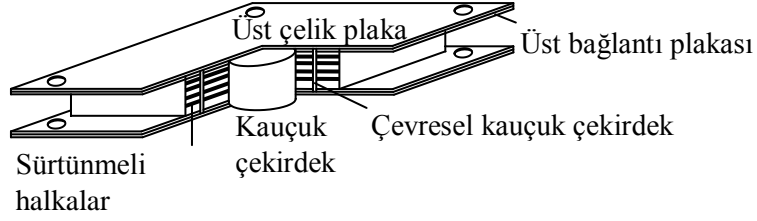


c) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

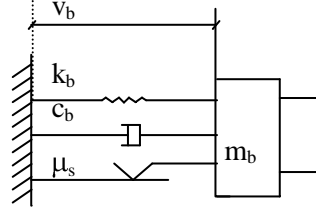
Şekil 1.3. Yeni Zelanda mesnet sistemi

1.3.3. Elastik Sürtülmeli Mesnet Sistemi

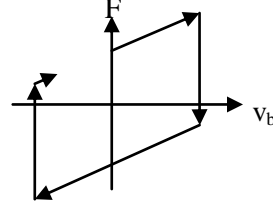
Elastik sürtülmeli mesnet sistemi (ESM) Mostaghel ve Khodaverdian (1987, 1988) tarafından önerilmiş bir sürtülmeli mesnet sistemidir. ESM sistemi birbirleriyle sürtülmeli bir şekilde teflon ile kaplanmış eşit merkezli daireler halinde bulunan plakalardan ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Plaka birleşimleri sürtünmeden dolayı sönüm artmaktadır. Mesnedin yerdeğiştirmesi ve hızının mesnet yüksekliği boyunca dağıtılması merkezi kauçuk çekirdek tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra sistem tepki kuvveti, sönüm ve sürtünme kuvvetinin davranışları birbirine paraleldir. Bu sistemin karakteristik özellikleri; sürtünme katsayısı (μ), sönüm sabiti (ξ) ve doğal frekansı (ω)'dır. Bu karakteristik özellikler için Mostaghel ve Khodaverdian (1987, 1988) tarafından $\omega = \pi/2$ rad/s, $\xi = 0,10$ ve $0,03 \leq \mu \leq 0,05$ değerlerinin alınması tavsiye edilmiştir. ESM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları, analitik modeli ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



a) Kesit ve elemanlar



b) Analitik model

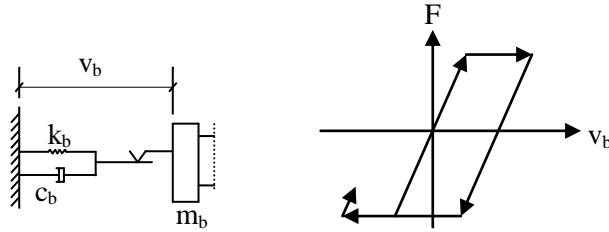


c) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 1.4. Elastik sürtülmeli mesnet sistemi

1.3.4. Fransız Elektrik Mesnet Sistemi

Sismik izolasyon sistemlerinden bir diğeri olan Fransız Elastik Mesnet (FEM) sistemi Fransız Elektrik Kurumu'nun desteği ile nükleer güç santrallerini depremin zararlı etkilerinden korumak için geliştirilmiş ve deprem bölgelerinde bu sistemi nükleer güç santralleri için standartlaştırmıştır. TKM sisteminin kesiti ile aynı olan FEM sistemi işlem ömrü boyunca sürtünme katsayısı 0,2 olarak tasarlanmıştır. FEM sisteminin analitik modeli, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



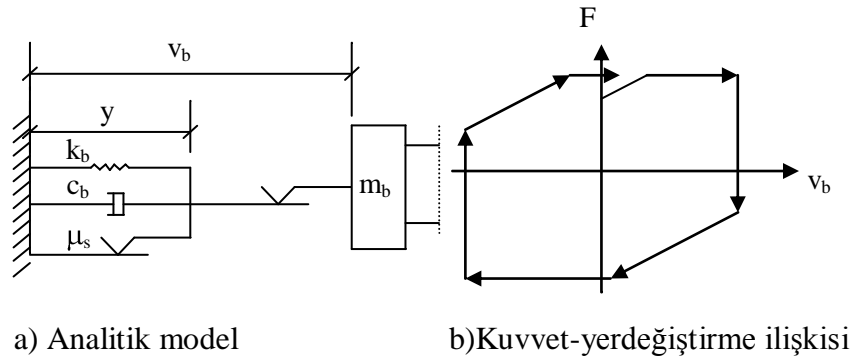
a) Analitik model

b) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 1.5. Fransız elektrik mesnet sistemi

1.3.5 Kayıcı Elastik Sürtünlü Mesnet Sistemi

Su vd. (1989b) tarafından önerilen Kayıcı Elastik Mesnet (KESM) sistemi ESM ve FEM sisteminin özelliklerini içermektedir. ESM sisteminin üst yüzüne sürtünlü bir tabaka yerleştirilmesi sonucu olarak FEM sisteminde olduğu gibi yapı temeli üzerinde kayabilmektedir. Sismik hareketlerin küçük olduğu zaman ESM gibi davranır. Deprem oluşturduğu sismik hareketin büyük olduğu durumlarda ise de üst yüzeydeki sürtünlü tabakada hareket gözlemlenir. KESM sisteminin analitik modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

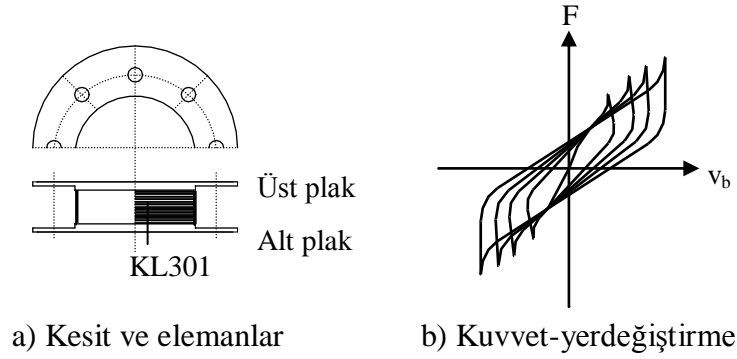


Şekil 1.6. Kayıcı elastik sürtünlü mesnet sistemi

1.3.6. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemi

Yüksek sönümlü kauçuk mesnet (YSKM) sistemi ile izole edilmiş sismik izolasyon sistemi, stratejik önem arz eden yapılar ve anıtsal yapılarda depremin zararlı etkisini azalttığı için önem kazanmıştır (Ceccoli vd,1999). Genelde kullanılan depremden koruma stratejisi, binanın temeli ile kolonu arasına yerleştirilen kauçuk mesnet kullanımlarında, binanın temel frekansının deprem kaydındaki hakim frekans aralığından daha düşük olarak düşünülmesidir. Yapılan çalışmalar gösteriyor ki, yakın çevredeki uyarım ve depremden dolayı oluşan yer hareketleri üst yapı ile temel arasına yerleştirilmiş sismik izolasyon aygıtlarında kabul edilemez ölçüde büyük yerdeğiştirmelere sebep oluyor. YSKM kullanımı, doğrusal aralıkta istenilen sonuç elde edilir iken yüksek enerji yitimi sağladığı için büyük ölçüde tavsiye edilir (Ceccoli vd,1999). Jangid ve Datta (1995), doğal kauçuktan yapılmış YSKM sistemi, yüksek sönümlü elastik bir maddenin karışımı olan KL301 adı verilen bir maddeden yapılmıştır. Bu madde Japonya'da Brigestone firması

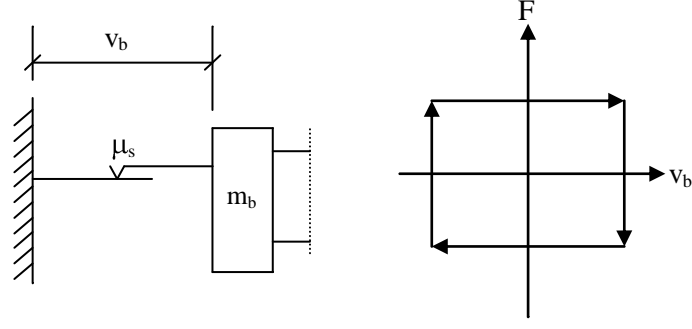
tarafından üretilmektedir. KL301'in çok küçük şekil değiştirmelerinde kesme modülü 4.300kPa, %50 şekil değiştirmelerde 650 kPa, %100 şekil değiştirmede 430 kPa ve %150 şekil değiştirmede 340 kPa'dır. Mesnet 2 mm kalınlığında 20 adet kauçuk tabakadan oluşmaktadır. Üst tarafta 2 mm kalınlığında birer çelik levha bulunmaktadır. YSKM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet sistemi

1.3.7. Sürtümlü Mesnet Sistemi

Prensip olarak sürtümlü mesnet sistemi (SMS) sürtümlü kayan bir mekanizmadır (Su vd., 1989a, 1990; Jangid, 1997). Yatay sürtünme kuvvetlerinden dolayı harekete karşı koyar ve oluşan enerjiyi emer. SMS, bina temelinde bir silindir veya kum tabakası kullanımı ile en iyi şekilde örneklendirilebilir. Bu sistem Çin'de depremin yıkıcı etkilerinden korunmak için az katlı binalarda kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Geniş frekanslı dağılım için etkili bir mesnet sistemidir. Mostaghel ve Tanbakuchi (1983) tarafından depremin yer hareketinden dolayı oluşan zarar verici etkisine karşı sürtümlü mesnet ile izole edilmiş yapının etkinliği üzerine çalışılmıştır. SMS geniş dağılımlı frekanslar için etkilidir. SMS'inde, sürtünme kuvveti temelde meydana gelirken hareket eden mesnedin kütle merkezi ve rijitlik merkezi yapının kütlesiyle orantılı olabilmektedir. Bundan dolayı simetrik yapılarda ortaya çıkan burulma etkileri azalmaktadır. SMS'nin analitik modeli, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



a) Analitik model

b) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 1.8. Sürtünlü mesnet sistemi

1.3.8. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi

Çapraz doğrusal hareket (ÇDH) sistemi, birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki tane doğrusal yaya monte edilen iki tane düşük sürtünlü doğrusal hareket eden bloktan oluşmaktadır. ÇDH sistemi Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Çapraz doğrusal hareket sisteminin görünüşü

ÇDH sistemi üzerinde yer alan tampon bloklar çok düşük sürtünme kuvvetine sahiptir. Bundan dolayı düşük kesme kuvveti karşılamaktadır. Yani, çok düşük yanal etkilerde dahi sistem hareket etmektedir. ÇDH sisteminin farklı bir özelliği ise, basınç kuvveti yanı sıra çekme kuvvetine karşı çalışabilmektedir. Hata ve Ogura’ya (2004) göre ÇDH tipi izolatörler, kurşun çekirdekli izolatörler ve diğer izolatör tipleri ile de birlikte kullanılmaktadır (Türker, 2005).

1.3.9. Çelik Bilyeli İzolatör

Çelik bilyeli izolatör (ÇBİ), düşük sürtünme katsayısına sahip iki adet çelik levha arasına yerleştirilmiş çok sayıda çelik bilyelerden oluşmaktadır. Bilyelerin sayısı, binanın düşey yüklerini karşılayacak şekilde ve izolatörlerin tasarımı sırasında ayarlanmaktadır. ÇBİ sistemi Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Hata ve Ogura'ya (2004) göre ÇBİ, kurşun çekirdekli izolatörler ve diğer izolatör tipleri ile de birlikte kullanılmaktadır (Türker, 2005).



Şekil 1.10. ÇBİ sisteminin görünüşü

1.3.10. Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemleri

Zayas vd. (1987), tarafından üretilen SSM sistemleri yukarıda bahsedilen sistemlere göre üretimi kolay ve dayanıklıdır. SSM sisteminden istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde etmek için mesnedin taşıdığı ağırlıktan ve sarkacın geometrisinden faydalanılır. Çevresel etkilere karşı dayanıklı ve uzun ömürlüdür (Zayas, 1990).

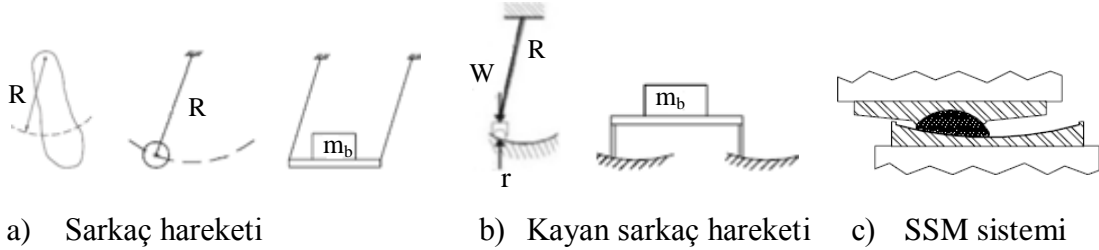
SSM sisteminin mühendislik prensiplerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. SSM sistemleri deprem izoasyonu yapılan yapı deprem hareketlerine karşı küçük genlikli sarkaç hareketleri ile tepki vermektedir. Bu nedenle SSM sisteminden istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde etmek için sarkacın taşıdığı ağırlıktan ve sarkacın geometrisinden faydalanılır. Kayıcı üzerindeki kompozit malzeme ile mafsallı kayıcı yüzey arasındaki hıza bağımlı sürtünme bulunmaktadır. Bu sürtünme yapıya iletilen sismik enerjiyi emmede faydalı olduğu vurgulanmıştır. (Tsai ,1997; Almazan vd., 1998; Tsai vd., 2003; Deb S.K., 2004; Tsopelas ve Constantinou, 1996; Zhou, Q. vd., 1994; Nagarajaiah vd., 1991). (Zayas vd., 1987; Zayas vd., 1990; Hamidi vd., 2003). Zayas vd. (1989), SSM'nin prensiplerini belirlemiş olup ve bu prensipler bütün sürtünmeli küresel kayıcı mesnetler için geçerlidir.

Bu mesnetler, depremden dolayı binaya iletilen yatay yükleri ve titreşim hareketlerini büyük ölçüde azaltır (Zayas vd., 1987 Tsai, 1997). SSM yapıyı ve bileşenlerini 8 büyüklüğündeki depremlerde korur ve yerin altından ve yakın civardaki titreşimlere uyum sağlayabilir. Sarkaç hareketinin ilkeleri ve yapılacak malzemenin özelliğinin iyi bilinmesiyle uzun ömürlü ve çevresel kirlenmelere karşı korumalı bir sistem tasarlanabilir.

SSM sistemi kayıcı bir sistem olup silindirik içbükey yüzey üzerinde kayabilen mafsallı kayıcıdan oluşmaktadır. Kayma tipindeki izolatörler genellikle paslanmaz çelik tabakalardan ve polytetrafluoroethylene karışımı olan kompozit malzemeden oluşur (Kim ve Yun, 2007). Bu mesnedin yapıldığı malzeme yüksek basınç mukavemetine sahiptir.

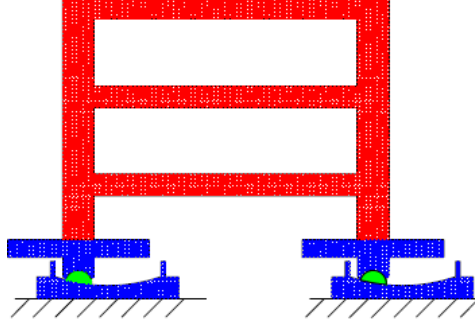
Mesnedin periyodu, sönümü, taşıdığı yük kapasitesi ve maksimum yerdeğiştirmesi birbirinden bağımsız olarak seçilir. SSM sisteminin dinamik periyodu 1–5 s arasında ve yerdeğiştirme kapasitesi 150 cm'ye kadar çıkabilir. Dinamik sürtünmeler %3 ile %20 arasındadır. Efektif sönüm aralığı %10 ile %40 arasındadır. Mesnetlerin her biri 13600 ton'a kadar düşey yük ve 9070 ton'a kadar gerilme kapasitesindeki yükleri taşıyabilir (URL-1, 2010). Ayrıca SSM çok yönlü özellikleri, en düşük maliyeti ve en iyi sismik performansı kullanmak yönünden olanak sağlar.

Sarkaç hareketi prensibine dayanan SSM sisteminin sarkaç hareketinden SSM sistemine geçişi Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Sarkaç hareketinin SSM sistemine geçişinin gösterilmesi

Şekil 1.11'in devamı



d) SSM'nin üst yapı ile temel arasına yerleştirilmesi

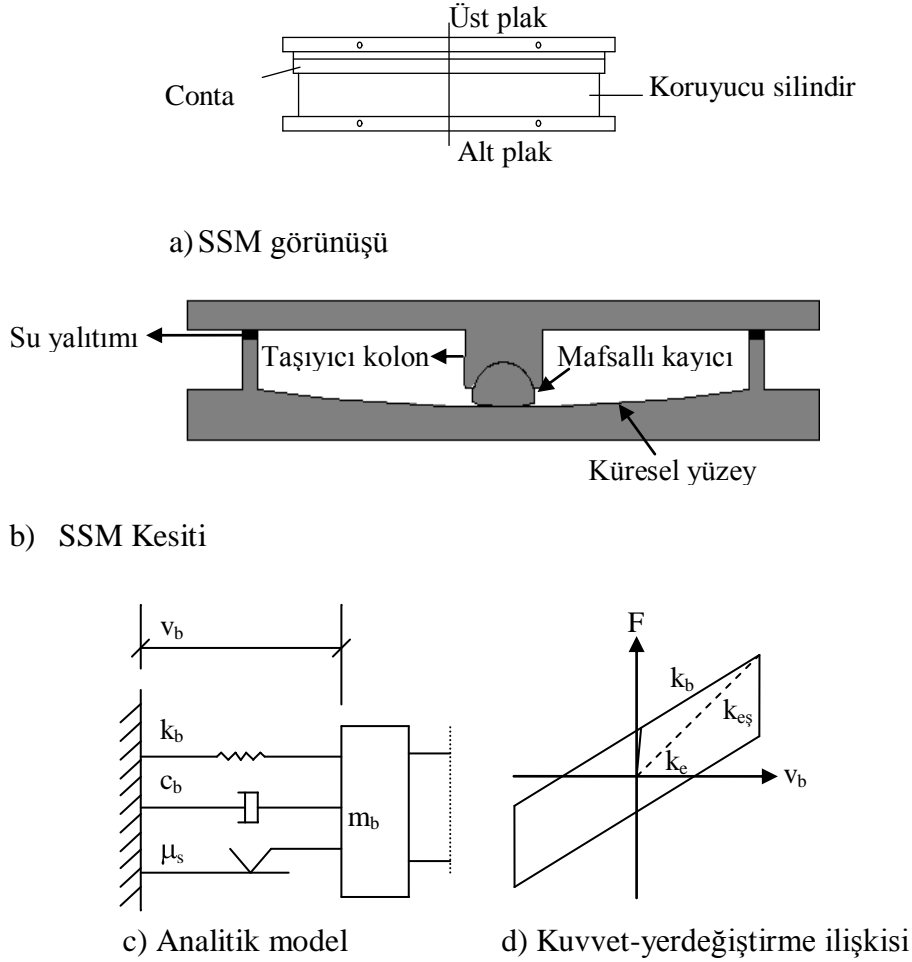
SSM sistemleri, izolasyonlu yapının doğal periyodunu arttırmak için sarkacın özelliklerini kullanır. Yüzeyin eğrilik yarıçapı seçilerek mesnedin periyodu belirlenir. Periyot mesnedin taşıdığı ağırlıktan bağımsızdır. Bu ifade denklem (1.1)'de açıkça görülmektedir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.1)$$

Burada, g yerçekimi ivmesini ve R eğrilik yarıçapını göstermektedir. Bu, izolatörün hareketli periyodu ve sürtülmeli sarkaç ile desteklenen yapının periyodudur (Zayas, 1990). Sürtülmeli sarkaç mesnet geometrisinin önemini vurgulamak için denklem (1.1) aşağıdaki gibi düzenlenirse,

$$R = 25T^2 \quad (1.2)$$

$T = 2$ s alınrsa sürtülmeli sarkaç mesnet sisteminin eğrilik yarıçapı, 100 cm olmaktadır. SSM'nin elemanları, en kesiti, analitik modeli ve kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Sürtünlü sarkaç mesnet sistemi

Mafsallı kayıcı eğri yüzey üzerinde hareket edince üst yapı yukarı doğru yükselip tekrar eski haline gelirken bir merkezlenme kuvveti oluşur. Mafsallı kayıcı ile küresel yüzey arasında sürtünmeden dolayı oluşan bu kuvvet deprem enerjisini sönmeler. Eğrilik yüzeyinin üste veya altta olması kinematiği ve uygulamayı etkilemez.

İçbükey yüzeyler ile temas halinde bulunan mafsallı kayıcı olarak isimlendirilen kayıcı kısım yüksek basınca dayanabilen sürtünlü mesnet malzemesi ile kaplanması gerekir. Yaygın olarak kullanılan 2 çeşit mesnet kaplama malzemesi vardır (Constantinou vd., 1990). Bunlardan biri olan Tecment-B malzemesi Japonya'da bir petrol endüstrisi şirketi tarafından üretilmektedir. Kaygan olan ara yüzeyi 48,3 MPa değerine yakın basınca dayanmaktadır ve içbükey yüzey ile mafsallı kayıcı arasındaki sürtünmeyi sağlamaktadır. Diğeri ise; kablolarla güçlendirilerek elde edilen yüksek taşıma kapasitesine sahip olan Örülmüş Teflon'dur. Kaygan olan ara yüzeyi 138 MPa değerine yakın basınca dayanmaktadır

Yapıya gelen deprem kuvveti sürtünme kuvvetinden küçük ise izolatörde herhangi bir hareket gerçekleşmez. Yapı sismik izolasyonsuz gibi tepki verir ve periyodu sismik izolasyonsuz yapının periyoduna eşit olur. Depremden gelen yatay kuvvetin değeri sürtünme kuvvetini aştığında izolatör harekete geçer ve yapı sismik izolasyonlu bir yapı olarak tepki verir ve periyodu sismik izolasyonlu yapının periyoduna eşit olur. SSM tasarımcıya çeşitli imkânlar sunar. Bunlar: Kayma periyodu arttırıldığına tabandaki kesme kuvveti azalır, izolatördeki yerdeğiştirme artar. Eğrilik yüzeyindeki sürtünme kuvveti azaltılırsa tabandaki kesme kuvveti azalır, izolatördeki yerdeğiştirme ise artar. İzolatör mesnetlerinin taşıdığı binanın kütle merkezi ile mesnetlerin rijitlik merkezi üst üste geldiği için binanın burulma hareketleri küçültülmüş olur.

Sismik izolasyon sisteminin işleyişinde daha sık olan küçük genlikli hareketler tasarımcılar tarafından genel olarak hesaba katılmaz. Düşük seviyeli sarsıntılar yerdeğiştirme veya dayanıklılık bakımından bir tasarım sorunu olmamasına rağmen verim açısından bir sorun olabilir. Daha büyük depremler için yeterli sönüm ve esneklik ile birlikte tasarımı yapılmış izolasyon sistemleri küçük titreşimlerde aktif olmayabilir. Bu yapıda taşıyıcı olmayan elemanlar için ters etki yapabilir. İzolasyon sistemi aktif olmasa tekrar merkezlenme bir sorun olabilir. Uyarlanabilen davranışlar, maksimum deprem sarsıntısında, tasarım düzeyinde ve düşük güç için ayrı ayrı en uygun hale getirmesine olanak verdiği için çok eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemleri bu tür zorlukların üstesinden gelir. (Fenz, 2008).

SSM sistemleri yakıt, endüstriyel kimyasal maddeler, kullanma ve yangın söndürme suyu gibi çelik sıvı tanklarının gereksinimlerini karşılama yönünden çeşitlilik sunar. SSM ile izole edilmiş yapının doğal periyodu üst yapının kütlelerinden bağımsız olup sadece eğrilik yarıçapına bağlıdır. Bu davranış sıvı tankları gibi değişken kütleli yapıların doğal periyodununun değişmesini engeller. Bu yapıların depremde hasar görmeleri çevresel tahribatlara ve büyük maddi kayıplarına sebep olur. Bu sebepten dolayı, oluşan hasar tiplerini ve hasarlara neden olan etmenleri araştırmak amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda depremden dolayı sıvı depolarının oldukça kötü bir şekilde hasar gördüğü tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak yapıları depremden korumak için çeşitli yenilikler araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmalardan biride sismik izolasyon uygulamasıdır. Sıvı tanklarında sismik yalıtım sistemleri kullanarak enerji sönümü artırılması ve hidrostatik basıncın azaltılması amaçlanmıştır. URL-2 (2010), SSM sisteminin hidrostatik davranışını Bouch-Wen modeli

kullanarak modellemiş ve sismik yalıtım sistemi ve tank parametrelerinin dinamik davranışa etkisinin incelenebilmesi için parametrik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma sonrasında, hidrostatik basınç ile tankı destekleyen yapı sistemine etkiyen kesme kuvveti ve moment değerlerinde azalma olduğu ancak sıvı yüzeyi hareketinde az bir artış olduğu görülmüştür.

Genel olarak SSM sistemleri neden kullanılır sorusuna cevap olarak aşağıdaki maddeler sıralanabilir.

- Dayanıklılık
- Uzun ömürlü ve yangına dayanımlı
- Çevresel koşullardan etkilenmeyen
- Kolay kurulum
- Yapıda ısı genleşmelere imkan sağlaması
- Gerçek boyutlarda test yapılabildiğinden tüm teknik özelliklerinin kontrol edilebilmesi
- Geçen zaman içinde teknik özelliklerinin değişmemesi ve bakım gerektirmemesi
- Her iki yatay yönde kullanılabilmesinden dolayı yapısal optimizasyona imkan sağlaması
- İzolatör boyutları diğer alternatiflere göre daha küçük olmasından dolayı daha küçük bir hacim kaplaması ve yapıdaki mimari düzeni bozmaması,

olarak sıralanabilir.

1.4. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Uygulamaları

1.4.1. Dünyadaki Uygulamalar

İzolasyon sistemlerinin dünyada uygulandığı pek çok yapılar vardır. Bu sistemler dünyada yaklaşık olarak 5000 civarında binaya pasif kontrol olarak uygulanmıştır. Bina türü yapılar göz önüne alındığında 2005 yılında Japonya'da 2700, Rusya'da 550, Çin'de 490, ABD'de 100, İtalya'da 31, Tayvan'da 24, Ermenistan'da 19 ve Yeni Zelanda'da 11 yapıya uygulanmıştır. Sismik izolasyon sistemlerinin uygulandığı bazı binalar, köprüler,

müzeler ve deniz platformlarının isimleri ve kullanılan sismik izolasyon mesnetlerinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Benicia–Martinez Köprüsü San Francisco Bay Area’da yapılan bu köprüsünde kullanılan sismik izolasyon mesnedi 1200mm’nin üzerinde bir yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Şekil 1.13c’den kullanılan SSM’nin büyüklüğü vurgulanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.13. Benicia–Martinez Köprüsü

2001 yılında San Francisco’da yapılan AboveNet binası 13000 m² kapalı alana sahiptir. Bu binayı depremin zararlı etkilerine karşı güçlendirmek için 97 tane sürtünmeli sarkaç mesnedi kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının alt sınırı 0,045 üst sınırı 0,067’dir. Şekil 1.14b’den görüldüğü gibi AboveNet Binasında SSM sistemleri binanın en alt kolonu ile üst yapı arasına yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.14. AboveNet Binası

SSM sisteminin 1996 yılında Yunanistan' da yapılan LPG tankında kullanılmış bir örneği mevcuttur. Şekil 1.15'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.15. Yunanistan'daki LPG tankı

2004 yılında Yunanistan' da Olimpiyat arkeoloji müzesinde milattan önce 300 yılında Praxiteles tarafından yapılmış olan Hermes heykelinde SSM sistemi kullanılmıştır (Şekil 1.16). Kullanılan 4 adet SSM sistemi 320 mm yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir.



Şekil 1.16. Hermes heykeli

Rusya’da petrol ve doğal gaz çıkartmak için Sakhalin adası civarında inşa edilmiş bir deniz platformu olan Sakhalin 2’de SSM sistemi kullanılmıştır (Şekil 1.17)



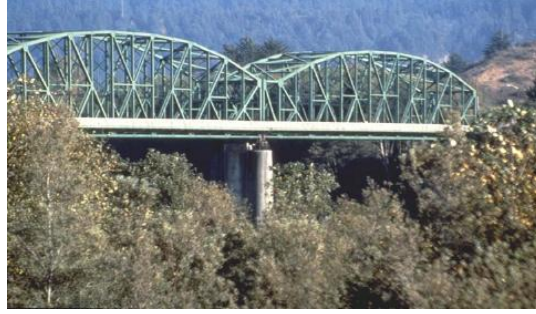
(a)



(b)

Şekil 1.17. Sakhalin 2 platformu (a) ve kullanılan SSM (b)

1987 yılında Kaliforniya’da yapılmış olan Eel River Köprüsü Petrolia depreminde 200mm hareket etmiş ve tekrar merkezlenmiştir. Depremden sonra yıkılmadan kaldığı ve hizmet etmeye devam ettiğinden dolayı SSM önemini ortaya koymuştur.



Şekil 1.18. Eel River Köprüsü

1.4.2. Ülkemizdeki Uygulamalar

Sismik izolasyon sistemlerinin Türkiye’de bazı binalarda (Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminal Binası, Sabiha Gökçen Uluslar Arası Hava Limanı, Tarabya Oteli, Erzurum Devlet Hastanesi, Ankara Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi, Antalya Hava Limanı), köprülerde (Bolu viyadükleri, Gülburnu Köprüsü) ve gaz tankında (İzmir Aliğa

doğal gaz tankı) uygulanmaktadır. Adı geçen bu yapılar ve bunlardan bazılarında kullanılan sismik izolasyon sistemlerinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

2000 yılında İstanbul'da 40320m² alana sahip olan Atatürk havalimanı dış hatlar terminalinin depreme karşı güçlendirilmesinde SSM sistemi kullanılmıştır. 3 katlı bir bina olarak inşa edilmiş olup Türkiye'de sismik izolatör kullanarak güçlendirilmiş ilk yapıdır. 130 adet izolatör çelik çatı ile çelik çatıyı destekleyen son kat betonarme kolonlar arasına yerleştirilmiştir. Dış hatlar terminal binasında yapılan bu sismik izolatör uygulaması ile 2001 yılında American Consulting Engineering Council büyük ödülünü almaya hak kazanmıştır. Orijinal hali ile karşılaştırıldığında deprem izolatörleri ile depreme karşı çok daha güvenli duruma getirilen terminal binası 8 büyüklüğündeki bir depremi sorunsuz bir şekilde atlatacak performansa getirilmiştir. Bu uygulama ile dünyaya açılan Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali büyük depremlerden sonra da hizmetine kesintisiz bir şekilde devam edecektir.



(a)



(b)

Şekil 1.19. Atatürk Hava Limanı Dış Hatlar Terminali

Sabiha Gökçen uluslararası havalimanı 160000 m² alanı ve kullanılan 252 izolatörü ile dünyanın en büyük kapalı alana sahip depreme dayanıklı yapılarından biridir (Zekioğlu vd., 2009). Kullanılan izolatör tipi üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemidir. Sismik izolasyonsuz olarak yapıldığı düşünüldüğünde taban periyodu 0,8 s iken izolasyonlu olarak yapıldığında taban periyodu 3 s olmuştur. Periyottaki bu artış, yapının üst seviyesinde ivmenin 2g'den 0,2g'ye düşmesine ve binanın en üst seviyesindeki kat ötelenmesini %2'den %0,3'e inmesini amaçlamaktadır. İzolatörlerin yerdeğiştirmeleri 345 mm olarak sınırlandırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1.20. Sabiha Gökçen uluslararası havalimanı terminal binası (a) ve birleşim detayı (b)

Tarabya Oteli mevcut bir bina olup depreme karşı güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, Tarabya otelinin en alt kolonları kesilerek güçlendirme amaçlı olarak SSM sistemi yerleştirilmiştir. Mevcut bina FEMA 356 ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (2007) şartlarına göre güçlendirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.21. Tarabya otelinin görünümü (a) ve kolonlarına yerleştirilen SSM sistemi (b)

Erzurum Devlet Hastanesi 22400 m² alana sahip olup yüksekliği 28m'dir. Hastane binası altı kat ve bir bodrumdan oluşmaktadır (Şekil 1.23). Hastanede 386 adet kurşun çekirdekli sismik izolasyon mesnedi kullanılmıştır. Sismik izolasyon mesnetlerinin nominal çapları 80 cm, 90 cm, 100 cm ve 110 cm olarak belirlenmiştir. 80 cm olan izolatörlerin bir kısmında kurşun çekirdek yoktur (Erdik, 2007).



(a)



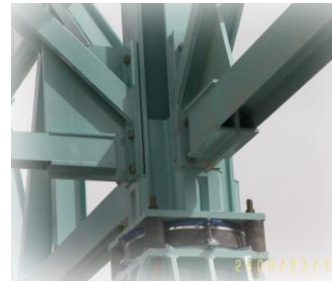
(b)

Şekil 1.22. Erzurum Devlet Hastanesi (a) ve kullanılan izolatör

Ankara Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi, Söğütözü mevkiinde Eskişehir yolu üzerinde bulunmaktadır. 26600 m²'lik bir kapalı alana sahiptir. Bina tamamlandığında 210000 m²'lik kullanım alanına ve 70 m yüksekliğe sahip olacaktır. Binanın bulunduğu yer deprem bölgesi olmayıp Kuzey Anadolu Fay hattına 110 km uzaklıktadır. Ancak bina sahibi binlerce kişiyi aynı anda bünyesinde barındıracağından dolayı prestij sahibi bu binayı depremden korumak istemiştir. Bundan dolayı çelik ve betonarme karma yapı sisteminde, betonarme kolonları ile çelik kısım arasında SSM sistemleri yerleştirilmiştir. Bu yapıda izolatörler 14 cm'lik yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Toplam 113 adet SSM kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1.23. Ankara Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi (a) ve kullanılan izolatör

Antalya havaalanı inşaatında bazı kolonlara güçlendirme yapılmıştır. Bu kolonlar geçici olarak çelik kolonlarla askıya alınmış ve sonra yaklaşık 1 metrelik kısımları kesilip buralara kurşun çekirdekli kauçuk mesnet izolatörleri yerleştirilmiştir.



Şekil 1.24. Antalya Havaalanı'ndaki sismik izolasyon uygulaması

1999'da gerçekleşen 7,2 büyüklüğündeki Düzce depreminde 2,3 km'lik kısmı tamamlanan TEM yolunun Bolu yakınlarındaki viyadükü depremden zarar görmüştü. Bu viyadükün tamir ve güçlendirilmesinde 536 adet SSM sistemi kullanılmıştır. Yerdeğiştirme kapasitesi 700 mm ve 900 mm olarak seçilmiştir. Sismik izolasyonun tasarımı American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1999'a uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 1.25. Bolu Viyadükü'nden görünüm

Gülburnu köprüsü dengeli konsol yöntemi ile inşa edilmiş olan ardgermeli ve yerinde dökme kutu kesitli bir köprüdür. Üç açıklıklı olan köprünün orta açıklığı 165 m, kenar açıklıkları 82,5 m olup toplam uzunluğu 330 m'dir. Toplam 8 adet tek eğrilikli sürtülmeli sarkaç mesnedi kullanılmıştır.



Şekil 1.26. Gülburnu köprüsü

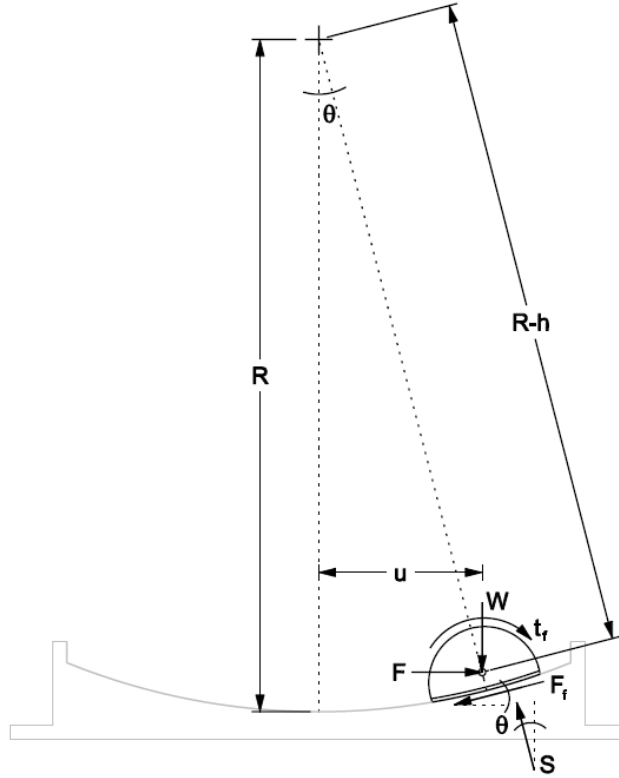
Bina ve köprülerde sismik izolasyonun kullanımı yanı sıra sanayi sektöründe de bu uygulama hayat bulmuş ve İzmir Aliğa'da bulunan Ege Gaz terminalindeki LPG tanklarının tabanında sismik izolasyonlu kullanılmıştır. 140.000 m³ kapasiteli bu tankların kenarlarında 112 adet kurşun çekirdekli kauçuk mesnet (LRB) ve iç kısımlarda 221 düşük sönümleyicili kauçuk mesnetler (LDRB) kullanılmıştır.



Şekil 1.27. İzmir Aliğa tankları

1.5. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri

SSM sisteminin ilki olan tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TESS) mesnet sistemine bölüm 1.3.10'da değinilmiştir. Bu kısımda TESS mesnedinin hareketinden dolayı oluşacak mekanik özelliklerinden bahsedilecektir. TESS mesnet sistemi küresel yüzey üzerine mafsalı kayıcıdan oluşmuş hareketli mesnet biçimidir. Uygulanan yatay kuvvet sürtünme kuvvetinden küçük olduğu zaman çok büyük elastik rijitliğe sahip (kayan malzeme ve mesnetteki küçük yerdeğiştirmeden dolayı davranış tam olarak rijit değildir) olan SSM sisteminde hareket olmaz. Sürtünme kuvveti, zaman içinde aşırı yüklenme ile sonuçlanan



Şekil 1.28. TESS mesnet sisteminin serbest cisim diyagramı

servis yüklemeleri altında mesnedin kaymasını engeller. Uygulanan yatay kuvvet sürtünme kuvvetini geçtiği zaman hareket başlar. Şekil 1.28’de TESS mesnet sisteminin serbest cisim diyagramı gösterilmiştir.

Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi geometriden ve denklemlerden elde edilir. Burada, W mesnedin taşıdığı yüküdür. F mesnet boyunca iletilen yatay yük; h eksen noktası ile küresel yüzeyin arasındaki dik mesafe; R küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı; θ dönme açısı; S kayma ara yüzleri boyunca uygulanan normal basınçtan meydana gelen kuvvet; u yerdeğiştirme; F_f kayma ara yüzeyi boyunca meydana gelen sürtünme kuvveti; t_f mafsallı kayıcının küresel yüzeyi boyunca olan sürtünme çekmeleri (Sürtünme çekmelerinin etkisi sürtünme kuvvetinin bir parçası olarak düşünülür ve bu yüzden denge denklemlerinde görünmez) dir.

Dinamik analizde denge denklemleri olduğu gibi kullanılır; ancak $\mu(\dot{u})$ anlık kayma hızının bir fonksiyonu olarak her bir zaman adımında yenilenir. Tek değerli sürtünme katsayısı kullanmak bir basitleştirme, formülasyonları sınırlandırmaz. Sırasıyla yatay ve düşey yöndeki denge denklemleri kurulursa denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F - S \sin \theta - F_f \cos \theta = 0 \quad (1.3)$$

$$W - S \cos \theta + F_f \sin \theta = 0 \quad (1.4)$$

Geometriden, u kayıcının eksen noktasının yatay yerdeğiştirmesi olduğu görülür ve aşağıdaki denklemdeki gibi yazılır.

$$u = (R - h) \sin \theta = R_{\text{eff}} \sin \theta \quad (1.5)$$

Burada, R_{eff} ; efektif eğrilik yarıçaptır.

1.3, 1.4 ve 1.5 denklemleri birleştirilirse TESS mesnedi için hareketi kontrol eden kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki denklemdeki gibi olur.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}} \cos \theta} u + \frac{F_f}{\cos \theta} \quad (1.6)$$

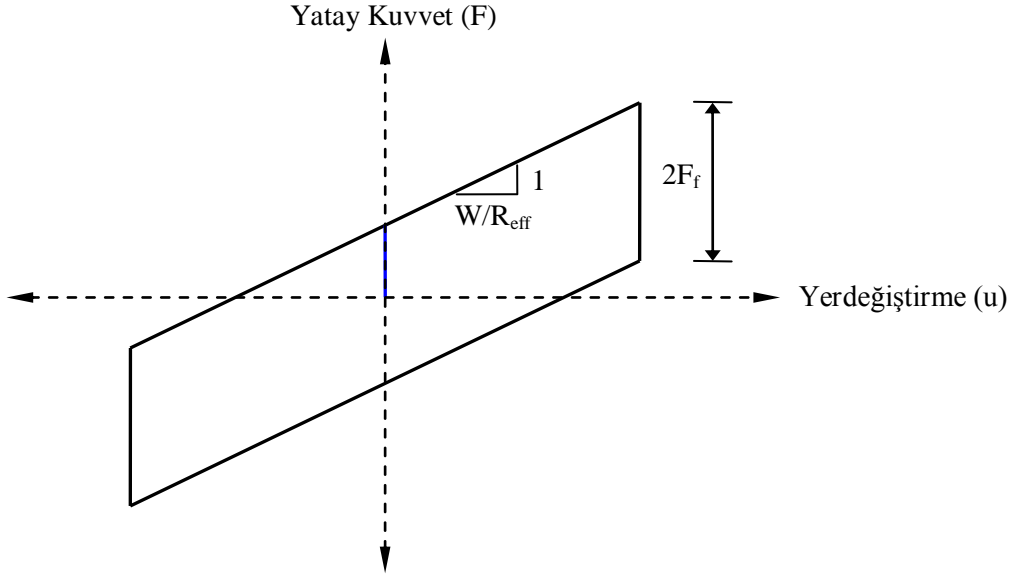
Çoğu uygulamalarda eğrilik yarıçapı yatay yerdeğiştirmeye oranla oldukça büyük olduğu için $\cos \theta \cong 1$ 'dir. Dolayısıyla denklem (1.6) denklem (1.7) şeklinde yazılır.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}}} u + F_f \quad (1.7)$$

Bu sadeleştirme %5'ten daha az bir hata ortaya çıkarır. Bu da eğrilik yarıçapının %30'undan daha az bir yatay yerdeğiştirmeyi karşılar. 1.3-1.7 denge denklemleri Zayas vd. (1987) tarafından ileri sürülmüştür.

Denklem (1.7)'nin ilk kısmı sarkacın rijitliğini verir. Sarkacın rijitliği ise denklem (1.8) ile verilmektedir.

$$K_H = \frac{W}{R} \quad (1.8)$$



Şekil 1.29. Tek eğrilikli sürtümlü sarkaç mesnedin histeretik davranışı

Sarkacın rijitliği mesnedin taşıdığı ağırlık ile doğru orantılı; yarıçapı ile ters orantılı olduğu formülden de görülmektedir.

Sürtünme kuvvetinin harekete zıt yönde olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 1.29'da verilen döngüsel kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi denklem (1.7)'ye dayanmaktadır.

Hareketin ters dönmesi ile mesnedin $2F_f$ kuvvetiyle tam olarak yükü boşalır ve $\frac{W}{R_{eff}}$ plastik rijitliği ile harekete zıt yönde kayar. Bu tip davranış rijit doğrusal davranış olarak adlandırılmıştır.

Eşdeğer rijitlik, denklem (1.9) ile verilmiştir.

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \mu \frac{W}{u} \quad (1.9)$$

Kayan yüzeydeki sürtünme ile oluşan sönüm, denklem (1.10) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$B_{eff} = \frac{4\mu Wu}{2\pi K_{eff} u^2} \quad (1.10)$$

Bu denklemde, kesrin payı bir çevrimde sönümlenen enerji miktarını veren histeritik döngü alanını temsil eder. Denklem (1.10)'da K_{eff} yerine yazılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa denklem (1.11) elde edilir.

$$B_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\frac{u}{R} + u} \right) \quad (1.11)$$

Mesnedin düşey yerdeğiştirme miktarı, δ_v , denklem (1.12)'de verilmektedir.

$$\delta_v = R \left[1 - \cos\left(\arcsin\left(\frac{u}{R}\right)\right) \right] \quad (1.12)$$

Düşey yerdeğiştirme hesabı, yaklaşık olarak denklem (1.13) ile de hesaplanabilir.

$$\delta_v = \frac{u^2}{2R} \quad (1.13)$$

Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi düşey yerdeğiştirmenin yatay yerdeğiştirmenin karesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

SSM sisteminin önemli özelliklerinden biri de, R eğrilik yarıçapının, u yerdeğiştirme miktarından daha küçük olmasıdır. Bu durumda, yatay kuvvet sürtünme kuvvetinden daha küçük olmakta ve mesnette yeniden merkezlenme meydana gelmektedir. Ancak $u/R \leq \mu$ olması durumunda yeniden merkezlenme meydana gelmemektedir. Bu durum uzun periyotlu sistemlerde meydana gelmektedir. Mesela, periyodu 5 s, eğrilik yarıçapı 625 cm. ve sürtünme katsayısı 0,07 olan SSM sisteminde yerdeğiştirme miktarının $u \leq 437,5$ mm olması durumunda yeniden merkezlenme meydana gelmemektedir.

Yakın fay civarında kurulmuş yapılar büyük yerdeğiştirme gereksinimlerine ihtiyaç duydukları için tasarlanan TESS sistemi ebat olarak büyük ölçülere ulaşmaktadır. TESS sisteminin ebatlarında küçültmeler yapmak için çalışmalar yapılmıştır. Kelly (1999), TESS mesnet sistemi ile birlikte sönümleyiciler kullanmıştır. İzolatör yerdeğiştirmelerinde ve taban kesmelerinde azalma olduğunu gözlemlemiştir. Ancak kat ivmeleri ve ara kat

ötelenmelerinin arttığını gözlemlemiştir. Bunun sonucu olarak sönümleyici kullanmanın hata olduğunu belirlemiş ve değişik çözüm yolları önermiştir.

1.5.1 Sürtünme Katsayısı

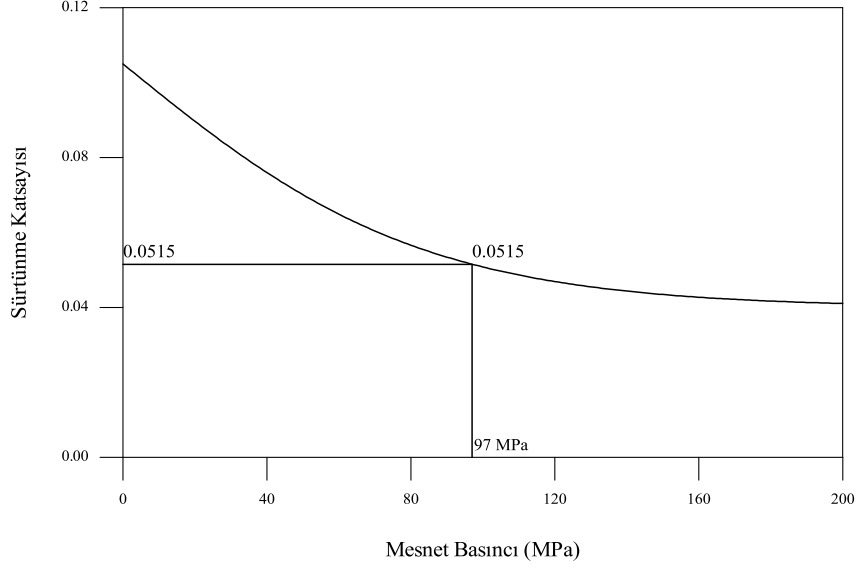
Sürtünme katsayısı mesnet basıncına ve kayma hızına bağlı olarak değişmektedir (Rousis ve Constantinou, 2006; Tsopelas ve Constantinou, 1996; Constantinou vd., 1994). Sürtünme katsayısı denklem (1.13)'te verilmiştir.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \exp -a |\dot{D}| \quad (1.14)$$

Denklem (1.14) Constantinou vd. (1994) tarafından ileri sürülmüştür. Bu denklemde, f_{\max} sürtünme katsayısının maksimum değerini; f_{\min} sürtünme katsayısının minimum değerini; a sürtünme katsayısının minimum ve maksimum değerleri arasındaki geçişi kontrol eden ve hıza bağlı katsayıyı; \dot{D} ise sarkacın kayma hızını göstermektedir. f_{\min} değerinin basınç ile değişmediği kabul edilirken f_{\max} değeri basıncın değişmesi ile değişir ve denklem (1.15)'te gösterilir.

$$f_{\max} = f_{\max 0} - (f_{\max 0} - f_{\max p}) \tanh \varepsilon P \quad (1.15)$$

Bu denklemde, $f_{\max 0}$ mesnet basıncının yaklaşık olarak 0 olması durumunda sürtünme katsayısını; $f_{\max p}$ mesnet basıncına bağlı sürtünme katsayısını; ε maksimum sürtünme katsayısının yüksek ve düşük basınçlar arasındaki geçişi kontrol eden bir katsayı ve P mesnet basıncını göstermektedir. Sürtünme katsayısının mesnet basıncına bağlı olarak değişimi Şekil 1.30'da gösterilmiştir. Mesnet basıncı, kolon yükünün temas alanına bölünmesiyle elde edilen değer olup temas alanı ise yarım küre şeklindeki mafsallı kayıcının içbükey yüzeyle temas eden dairesel bölgenin alanıdır.



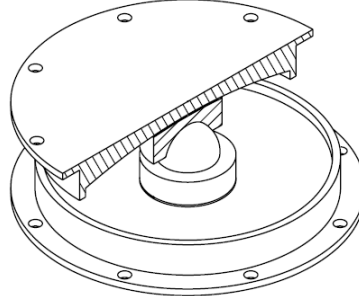
Şekil 1.30. Sürtünme katsayısının mesnet basıncına bağlı olarak değişimi

1.6. İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri

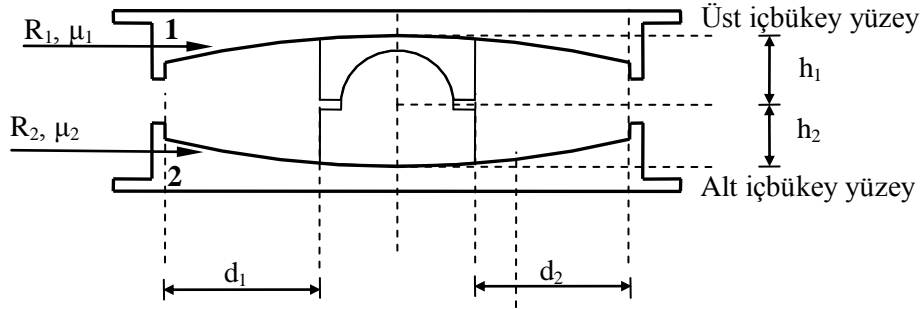
Tsai vd., (2003), iki tane küresel içbükey yüzeyden ve bunların arasına yerleştirilmiş kayıcı mafsaldan oluşan bu sistemi önermişlerdir. Bu sistemde depreme karşı verimliliği artırmak ve ebatlarının daha küçük olabileceği uygun görülmüşlerdir. İki eğrilikli iç bükey mesnet kavramı ilk belgelenmiş sismik izolasyon yöntemidir (Fenz, Constantinou, 2006). Daha öncede bahsedildiği gibi bu sistem, Jules Touaillon tarafından patenti alınmış bir çift içbükey yuvarlanan küre mesnedinden oluşur. İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç (İESS) mesnet sistemi iyi bilinen TESS mesnet sisteminden alıntı yapılmıştır. Çalışma mekanizması TESS mesnet sistem ile aynıdır. Esas özelliği yerdeğiştirme kapasitesinin özdeş plan boyutlarındaki TESS mesnet sisteminden daha fazla olmasıdır. Ayrıca kaymanın gerçekleştiği yüzeylerde değişik sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları kullanılabilme özelliğine de sahiptir (Fenz ve Constantinou, 2006). İESS mesnet sistemi Şekil 1.29 - 1.30'da gösterilmiştir. Şekil 1.30b'de görüldüğü gibi alt içbükey yüzey üst içbükey yüzeyden küçük olduğu gibi bunun tersi olması da mümkündür.

İESS mesnet sistemi adından da anlaşıldığı gibi iki tane paslanmaz çelik yüzeyden oluşur. Alt ve üst küresel yüzeyler sırasıyla R_1 ve R_2 eğrilik yarıçapına sahiptir. Bunlar eşit veya farklı olabilir. Küresel yüzeylerin sürtünme katsayıları sırasıyla μ_1 ve μ_2 dir. Bu sürtünme katsayıları eşit olduğu gibi farklı da olabilirler. Farklı sürtünmeler, eğrilik yarıçapları ve yerdeğiştirmeler kullanarak uygulamada istenilen faydaları elde edebilmek

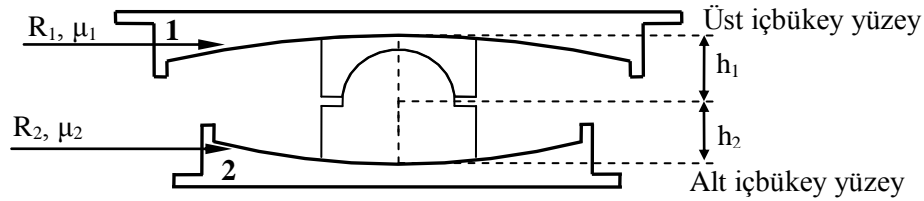
mümkündür. Alt ve üst yüzeylerin nominal yerdeğiştirme kapasiteleri sırasıyla d_1 ve d_2 'dir. İESS mesnet sisteminde alt ve üst içbükey eğrilik yüzeylerinde eş zamanlı kayma oluşur. Mesnedin tümünün toplam yerdeğiştirme kapasitesi $d_1 + d_2$ 'dir. Bu durum, Şekil 1.31c'de görülmektedir. TESS mesnet sisteminde toplam yerdeğiştirme kapasitesi d_1 ya da d_2 'dir. İESS mesnet sistemini tasarlayan kişi bu sistemin daha küçük olup daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğunu görür. Gerçek yerdeğiştirme kapasitesi, kayıcının dönmesinden ve yükseklik etkilerinden dolayı nominal yerdeğiştirme kapasitesinden çok az farklıdır (Fenz ve Constantinou, 2006; Fenz, 2008).



Şekil 1.31. İESS mesnet sisteminin kesiti



(a)



(b)

Şekil 1.32 İki eğrilikli mesnet sisteminin eşit eğrilikli yüzeyi (a) ve farklı eğrilikli yüzey (b) en kesitleri

Mesnedin yükseklikleri h_1 ve h_2 'dir. Bu yükseklikler, sırasıyla eksen noktası ile üst ve alt içbükey yüzeylere olan dik mesafedir. Eksen noktasına uygulanan yatay ve düşey kuvvetlerden dolayı denge denklemlerinden mesnedin yükseklikleri anlaşılır. Bundan dolayı da denge denklemlerinde etkili eğrilik yarıçapının $R_{\text{eff}1} = R_1 - h_1$ ve $R_{\text{eff}2} = R_2 - h_2$ olduğu ortaya çıkar.

İESS mesnedinde mafsal kullanılmadığı zaman, özellikle sürekli hareketlerin olduğu köprüler gibi sanat yapılarında mesnet pürüzlü aşınmalara maruz kalır. Zamanla sürtünme özelliklerinde büyük değişimler olabilir. Kullanılmayan bu mafsal, kayan ara yüzeyler üzerinde basıncı uygun bir şekilde dağıtmak, üst ve alt kayma yüzeyler boyunca farklı hareketleri düzenlemek, temas yüzeyleri üzerindeki yükü düzgün bir şekilde yaymak ve aşırı yıpranmaktan kaçınmak için gereklidir. (Tsai vd.,2004b; Tsai vd., 2005), İESS mesnet sistemine benzeyen mafsalı olan birden çok içbükey yüzeyli bir sürtünmeli sarkaç mesnet sistemini tanımlamışlardır.

Kayıcı Şekil 1.31'de görülen eksen noktası olarak adlandırılan eksen etrafında döner. Top biçimindeki mafsal, oyuk içinde fiziksel olarak sınırlanmasından dolayı İESS mesnedi merkezi eksen etrafında döner (TESS mesnet sisteminde olduğu gibi).

1.6.1. İESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi

Fenz (2008), İESS mesnet sisteminin kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisinin işleyişi esas olarak Constantionu (2004) ve Fenz ve Constantinou (2006)'ya dayanmaktadır. Şekil 1.33'de çeşitli aşamalarda İESS mesnedinin en kesiti görülmektedir. Şekil 1.33a mesnedin sıfır yerdeğiştirmesini; Şekil 1.33b sadece alttaki içbükey üzerinde mesnedin uğradığı kayışı ve Şekil 1.33c mesnedin maksimum yerdeğiştirme kapasitesini göstermektedir. Şekil 1.33b'deki kayış, alttaki içbükey yüzeyin sürtünme katsayısının üstteki içbükey yüzeyin sürtünme katsayısından az olduğu durumlarda gerçekleşir. Şekil 1.33b şeklindeki hareketlerde mafsalı kayıcının dönmesi gerekir. Çünkü her iki yüzey için verilen sürtünme katsayıları tam olarak aynı olmayabilir. Bu yüzden daima bir dönme vardır. Bu durum mafsalın önemini gösterir. Eğer mafsal olmasa kayıcı düzgün olmayan aşınmalara maruz kalır.

Her iki yüzeyde sürtünme katsayılarının eşit olduğunu dikkate alarak üç kayma durumu aşağıdaki gibi incelenir.

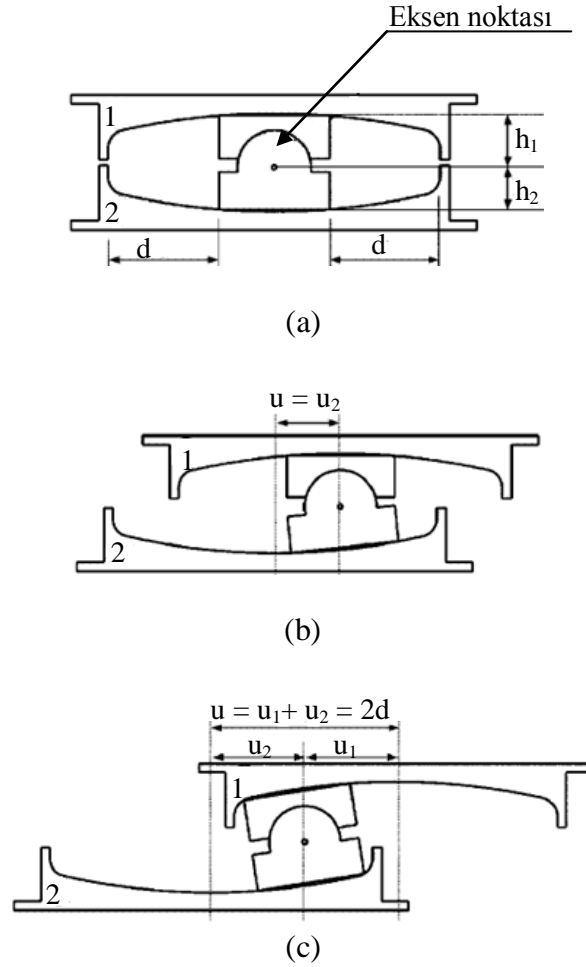
Kayma durumu 1: Kayma sadece sürtünmenin en az olduğu yüzeyde başlar.

Kayma durumu 2: Uygulanan kuvvet, sürtünmenin daha büyük olduğu yüzeyde sürtünme kuvvetini geçtikten sonra her iki yüzeyde eş zamanlı kayış gerçekleşir.

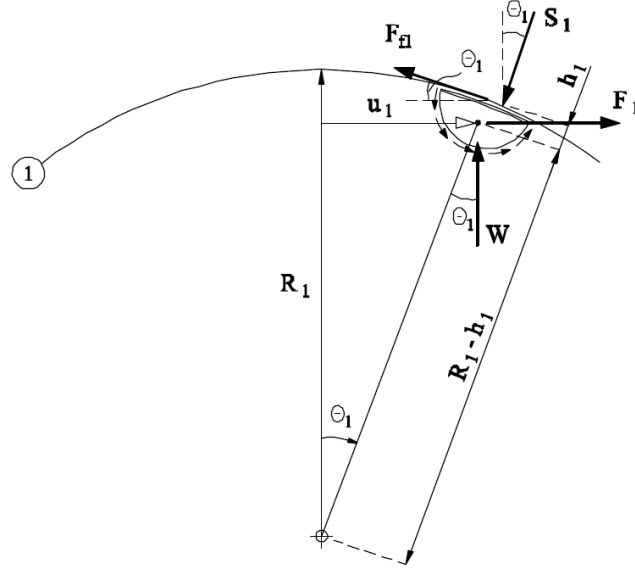
Kayma durumu 3: Yerdeğiştirme sınırlayıcısının bir yüzey ile temas ettikten sonra kayış sadece diğer yüzeyde gerçekleşir.

Her bir kayma durumundaki davranış, şekil değişikliği olan mesnedin dengesinden ve geometrisinden elde edilir ve genelde eşit sürtünme katsayısı kullanılan sistemin kuvvet-yerdeğiştirme formülleri çıkartılır (Fenz ve Constantinou, 2006).

Kayan üst ve alt yüzeylerdeki hareketler ayrı düşünülmalıdır. Şekil 1.33a'ya bakılırsa alt içbükey yüzeyde kayıcının sabitlendiği düşünülüp üst içbükey yüzeye uygulanan yatay kuvvetlerle kayıcı sağa doğru hareket eder. Yani kayıcı üst içbükey tabakada hareket eder. Şekil 1.34'de bu hareketin serbest cisim diyagramı görülmektedir. Basit olarak verilen bu serbest cisim diyagramı düşünülerek her bir durum için kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi çıkartılır.



Şekil 1.33. Çeşitli aşamalarındaki İESS mesnedinin en kesiti



Şekil 1.34. İESS mesnet sisteminin serbest cisim diyagramı

1.6.1.1 İESS'de Kayma Durumu 1

Uygulanan yatay kuvvet, küçük sürtünme katsayısına sahip yüzeydeki sürtünme kuvvetini geçtiği zaman hareket başlar. Yani $F = F_{f1}$ olduğu zaman 1 yüzeyinde hareket başlar ($u_1 < u_2$ olduğu düşünülürse). Şekil 1.34 kullanılarak yatay ve düşey yöndeki dengelerden denklem (1.16) ve (1.17) elde edilir.

$$W - S_1 \cos \theta_1 + F_{f1} \sin \theta_1 = 0 \quad (1.16)$$

$$S_1 \sin \theta_1 + F_{f1} \cos \theta_1 - F_1 = 0 \quad (1.17)$$

Burada, W eksen noktasına uygulanan düşey yük; F_1 mesnedin alt parçasından kayıcının üst parçasına doğru uygulanan yatay kuvvet; F_{f1} kayıcının ara yüzeyi üzerine uygulanan sürtünme kuvveti; S_1 moment dengesinin sağlanması için kayıcının merkezinde gösterilen ve kayma ara yüzüne uygulanan normal kuvvettir. Ayrıca kayıcıya uygulanan kuvvetlerden biri de mafsallı kayıcının küresel yüzeyi boyunca olan sürtünme etkisidir.

Geometriden aşağıdaki denklem (1.18) elde edilir.

$$u_1 = (R_1 - h_1) \sin \theta_1 \quad (1.18)$$

Burada, u_1 ; üst içbükey yüzey üzerinde gerçekleşen kayıcı hareketidir.

Denklem (1.16), (1.17) ve (1.18) birleştirilir ise denklem (1.18) elde edilir.

$$F_1 = \frac{W}{(R_1 - h_1) \cos \theta_1} u_1 + \frac{F_{f1}}{\cos \theta_1} \quad (1.19)$$

Yerdeğiştirme kapasitesi etkili yarıçap R_{eff} ile karşılaştırıldığında yeteri kadar küçük olduğundan dolayı $\cos \theta \cong 1$ olur. Böylece denklem (1.19) aşağıdaki gibi sadeleştirilir.

$$F_1 = \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + F_{f1} \quad (1.20)$$

(1.16)-(1.20) denklemler daha önce de TESS mesnet sisteminde yer almıştı. Zayas vd.'e (1987) göre, 1.16-1.20 denklemler, geleneksel TESS mesnet sisteminin denge denklemleridir (Fenz, 2008).

bu denklemler aslen Zayas vd., (1987) tarafından üretilmiştir.

2 yüzeyinde hareket başlamadığı için $u_2 = 0$ olur ve mesnedin geneli için kuvvet-toplam yerdeğiştirme ilişkisi, $u = u_1 + u_2$ eşitliğine dayanarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u + F_{f1} \quad (1.21)$$

1.6.1.2. İESS'de Kayma Durumu 2

Uygulanan yatay kuvvetin artmasıyla birlikte, $F = F_{f2}$ olduğu anda kayma 2 yüzeyinde başlar. Bu durum, denklem (1.22)'de verilen u^* yerdeğiştirmesinde ortaya çıkar.

$$u^* = (u_2 - u_1) R_{eff1} \quad (1.22)$$

$F = F_{f2}$ olduğu anda yerdeğiştirme nedeniyle, denklem (1.21)'i çözerek denklem (1.22) elde edilir. Kayma durumu 2, kayma durumu 1 ile kıyaslandığında artan u_1 yerdeğiştirmesinden başka bir farklılık olmadığı görülür. Bu yüzden denklem (1.19) 1 yüzeyinde geçerliliğini korur. Şekil 1.34 kullanılarak yatay ve düşey yöndeki dengelerden 2 yüzeyi için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$F_2 = \frac{W}{R_{\text{eff}2}} u_2 + F_{f2} \quad (1.23)$$

Denklem (1.20) üst kayan yüzeyin, denklem (1.21) ise alt kayan yüzeyin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinde kullanılır. Tüm mesnedin kuvvet-toplam yerdeğiştirme ilişkisini belirlemek için denklem (1.20) ve denklem (1.21) birleştirilir. Mesnedin toplam yerdeğiştirme kapasitesi 1 ve 2 yüzeyindeki yerdeğiştirme kapasitelerinin toplamına eşittir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}2}} u + \frac{F_{f1} R_{\text{eff}1} + F_{f2} R_{\text{eff}2}}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}2}} \quad (1.24)$$

Denklem (1.20) ve (1.21)'den her bir yüzeyin münferit yerdeğiştirmeleri aşağıdaki denklemlerden elde edilir.

$$u_1 = \left(\frac{F - F_{f1}}{W} \right) R_{\text{eff}1} \quad (1.25)$$

$$u_2 = \left(\frac{F - F_{f2}}{W} \right) R_{\text{eff}2} \quad (1.26)$$

Mafsallı kayıcının alt ve üst parçalarının dönme açıları sırasıyla θ_1 ve θ_2 'dir. Geometriden ve denklem (1.25) - (1.26)'den θ_1 ve θ_2 açıları aşağıda elde edilir.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{u_1}{R_{\text{eff}1}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{F - F_{f1}}{W} \right) \quad (1.27)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{u_2}{R_{\text{eff}2}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{F - F_{f2}}{W}\right) \quad (1.28)$$

1.6.1.3. İESS'de Kayma Durumu 3

$u_1 < u_2$ olduğu düşünülürse, kayma durumu 2'deki kayma başlamasından itibaren kayıcı yerdeğiştirme sınırlayıcılarından birine değene kadar artan yerdeğiştirme büyüklüğü ile birlikte 1 ve 2 yüzeyinde eşzamanlı kayma devam eder. Hangi yüzeyin yerdeğiştirme sınırlayıcısına önce değeceği tasarlayan kişi tarafından uygun u_1 ve u_2 yerdeğiştirme kapasiteleri belirlenerek karar verilebilir; ancak mesnedi tasarlayan kişi kayıcının yerdeğiştirme sınırlayıcısına 2 yüzeyinden önce 1 yüzeyinde değmesini ister (Fenz, 2008). Yerdeğiştirmeyi daha iyi kontrol etmek için yerdeğiştirmeleri artırmadan önce sürtünme kuvvetleri artırılır. Bunu elde etmek için $F_{\text{dr}1} < F_{\text{dr}2}$ olması gerekir. Yerdeğiştirme kapasitesi açısından bu gereksinim aşağıdaki denklem (1.28)'den elde edilir.

$$d_1 < \frac{R_{\text{eff}1}}{R_{\text{eff}2}} d_2 + (\mu_2 - \mu_1) R_{\text{eff}1} \quad (1.29)$$

1 nolu yüzeydeki yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde anda $u_1 = d_1$ olur ve toplam yerdeğiştirme aşağıdaki denklem (1.30) olarak elde edilir.

$$u_{\text{dr}1} = d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff}2}}{R_{\text{eff}1}}\right) - (\mu_2 - \mu_1) R_{\text{eff}2} \quad (1.30)$$

Yerdeğiştirme kapasitesi, $u_{\text{dr}1}$ 'i geçtiği zaman kayma sadece 2 yüzeyinde olur.

Kayıcı 1 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas ettikten sonra ek bir kuvvet olarak F_{f1} kuvveti ortaya çıkar. Dolayısıyla 1 yüzeyi için kuvvet yerdeğiştirme kapasitesi aşağıdaki denklem (1.31) ile elde edilir.

$$F_1 = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (1.31)$$

Eğer yerdeğiştirme sınırlayıcısı elastik ve rijit olduğu düşünülürse kayma durumu 3 boyunca 1 nolu yüzeydeki göreceli yerdeğiştirme $u_1 = d_1$ olur ve yerdeğiştirme sınırlayıcısının kullandığı kuvvet aşağıda verilen denklem (1.32) gösterilir.

$$F_{r1} = F - F_{dr1} \quad (1.32)$$

1 nolu yüzeydeki mafsallı kayma durumu 2 ve 3'de aynı olmasından dolayı u_2 yerdeğiştirmesi denklem (1.26)'in aynısı olur. Öyleyse rijit olarak düşünülen yerdeğiştirme sınırlayıcısı için kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi $u = u_1 + u_2$ ile tekrar başlayarak elde edilir. $u_1 = d_1$ ve u_2 için denklem (1.26)'i kullanarak aşağıdaki denklem (1.33) elde edilir.

$$F_1 = \frac{W}{R_{eff2}}(u - d_1) + F_{r2} \quad (1.33)$$

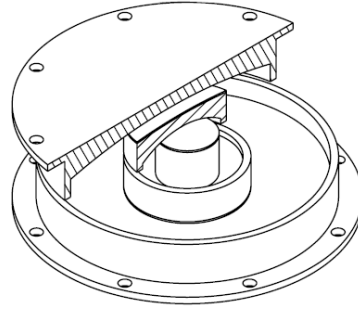
Denklem (1.33), kayıcı mafsallı 1 nolu yüzeydeki yerdeğiştirme sınırlayıcısına temas ettiğinde rijitlik $W/(R_{eff1} + R_{eff2})$ iken W/R_{eff2} olduğunu gösterir.

1.7. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sisteminin Mekanik Özellikleri

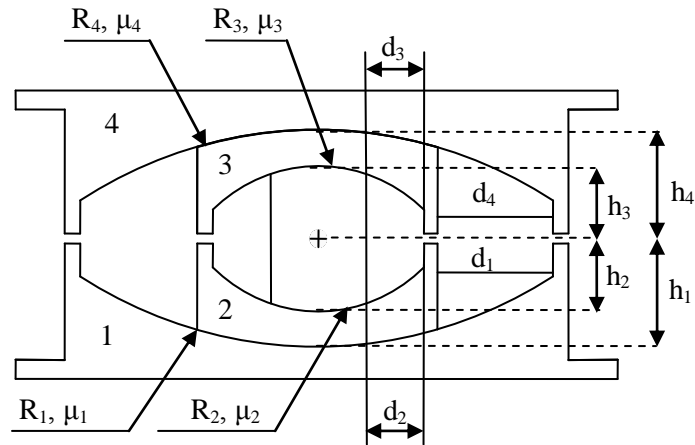
Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç (ÜESS) mesnet sistemi, kendince uyarlamalı sönüm ve rijitlik sergileyen bütünüyle pasif aygıttır. Bahsedilen bu uyarlamalı davranış, hesaplanabilen ve kontrol edilebilen yerdeğiştirme büyüklüklerindeki değerleri önceden bilmek suretiyle rijitlik ve sürtünmeyi değiştirmedir. Bu davranış, mesnedin doğasından kaynaklanmakta olup harici bir kuvvet uygulayarak yapılmaz. Üstelik mesnedin her bir değişkeni geleneksel sürtünmeli sarkaç mesnedinin bilinen ve anlaşılan sismik koruyucu teknolojilerinden türetilir (Fenz ve Constantinou, 2008a). Uygun bir şekilde yapılmış ÜESS mesnet sistemi, artan yerdeğiştirme talepleri ile birlikte rijitlik ve sönümde arzu edilir davranış sergiler (Fenz ve Constantinou, 2008b)

ÜESS mesnet sistemi geleneksel sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminden farkı, artan yerdeğiştirme büyüklüklerindeki rijitlik ve dayanımda birden çok farklılık sergilemesidir (Fadi, Constantinou, 2009). Geleneksel izolatör sistemlerine kıyasla ÜESS mesnet

siteminde, istenilen izolatör yerdeğiřtirmelerinde azalma ve/veya taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan sistemlerin ivme ve kesme kuvvetlerinde istenilen azalmalar gerçekleřebilir. İESS mesnet sisteminde olduđu gibi ÜESS mesnet sisteminde de deđiřik sůrtünme katsayıları ve eđrilik yarıçapları kullanılabilir. ÜESS mesnet sisteminin kesiti ve en kesiti sırasıyla řekil 1.35 ve 1.36’da gůsterilmiřtir. řekil 1.36’dan de gůrůldůđü gibi ÜESS mesnet sistemi paslanmaz çelikten yapılmıř iki tane eđrisel ibůkey kůresel plakadan ve aynı řekilde onun içine yerleřtirilmiř kayma dőzeneđinden oluřur. řekilden de gůrůldůđü dıř taraftaki eđrilik yőzeyleri sırasıyla $R_{eff1} = R_1 - h_1$ ve $R_{eff4} = R_4 - h_4$ etkili eđrilik yarıçaplarına sahiptir. Burada, R_i i. kůresel yőzeyin eđrilik yarıçapını ve h_i i. kůresel yőzey ile mafsallı kayıcının eksen noktası arasındaki dik mesafedir. Mafsallı kayıcı, rijit kayıcının ikiye ayırdıđı paslanmaz iki tane ibůkey kůresel yőzeyden oluřur. En içteki



şekil 1.35. ÜESS mesnet sisteminin kesiti



şekil 1.36. ÜESS mesnet sisteminin en kesiti

kayıcı rijit olmasına rağmen düzeneğe bütün olarak üst ve alt tabakalarda farklı yönlerde dönebilmeye özelliğine sahiptir. Kaymanın gerçekleştiği dıştaki 1 ve 4 yüzeyi metal olmayan kayıcı malzeme ile kaplanmıştır. Bu yüzeylerdeki sürtünme katsayıları sırası ile μ_1 ve μ_4 tür. Bu sürtünme katsayıları aynı olduğu gibi farklı da olabilirler İç taraftaki iki kayan küresel yüzeyler $R_{\text{eff}2} = R_2 - h_2$ ve $R_{\text{eff}3} = R_3 - h_3$ etkili yarıçapa sahiptirler. Rijit kayıcının dışındaki 2 ve 3 yüzeyi metal olmayan kayıcı malzeme ile kaplanmıştır. Bu yüzeylerin sürtünme katsayıları sırasıyla μ_2 ve μ_3 dür. Yukarıda verilen özelliklerle rijit kayıcı, içteki paslanmaz çelikten oluşan kayma tabakalarının üzerinde hareket eder.

1-4 yüzeylerindeki nominal yerdeğiştirme kapasiteleri d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 ile gösterilir. İESS mesnet sisteminde olduğu gibi ÜESS mesnet sisteminde de kayıcının yüksekliğinden ve dönmesinden dolayı gerçek yerdeğiştirme kapasitesi nominal yerdeğiştirme kapasitesi ile tam olarak aynı değildir. ÜESS mesnet sisteminin bu özgün davranışı, hareketi boyunca çeşitli kayma yüzeylerinde yatay yerdeğiştirme kapasiteleri sayesinde sağlar. Bu yüzden, d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 yerdeğiştirme kapasiteleri tasarım parametreleri olarak gösterilmelidir. Bu parametreler sadece tüm yerdeğiştirme kapasitesini sınırlandırmaz genel davranışı da önemli derecede etkiler.

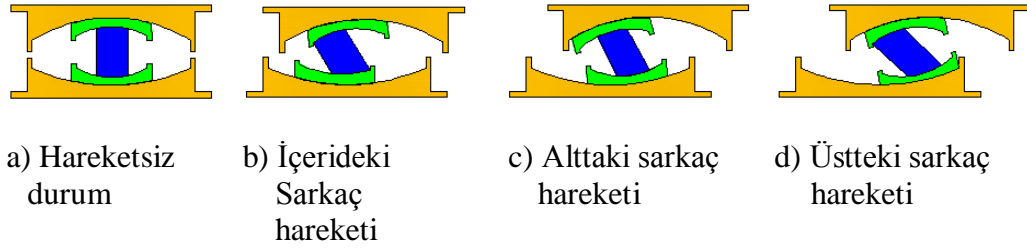
ÜESS mesnedinin TESS ve İESS mesnedinden farkı, eksen noktasında mekanik olarak tanımlanan bir kısıtlama olmayışıdır. Bunun yerine, eksen noktası sabit olmayan kayıcı düzeneğin sıfır dönme hızının anlık merkezine karşılık gelir. Gerçekte sıfır dönme hızının merkezinin yeri mesnetteki çeşitli yüzeylerde kayıcı başlayıp ve durduğu için değişecektir. Ancak kayıcı düzeneğinin alt ve üst parçalarındaki anlık hızlar daima harekete zıt yönde oldukları için sıfır hızın anlık merkezi bu iki parçanın arasında ve kayıcı düzeneğinin içinde olacaktır. Çoğu durumlarda kayıcının yüksekliği eğrilik yarıçapına oranla küçük olduğu ve mafsalı kayıcı düzeneğinin orta yüksekliğinde sıfır dönme hızı merkezinin tutulduğu varsayımı ile ortada küçük bir hata oluşacaktır.

ÜESS mesnet sisteminin en büyük avantajlarından biride küçük genlikli depremlerde dış yüzeylerde kayma olmaz iken kayma sadece iç yüzeylerde olur. Dış yüzeylerde hareket sadece kuvvetli depremlerde gerçekleşir. ÜESS mesnedinin bu temel kuralı sayesinde şiddetli olmayan depremlerde bu yüzeylerde herhangi bir aşınma olmadığından yıpranma olmaz. Bundan dolayı ÜESS mesnedi, TESS ve İESS mesnedine kıyasla daha uzun ömürlü olan sismik izolasyon aygıtları olarak bilinir. İESS mesnedinde olduğu gibi ÜESS mesnedinin küresel yüzeylerinde eşzamanlı kayış olduğundan dolayı aynı yerdeğiştirme

kapasitesini koruyarak daha küçük boyutlarda imalatı yapılabilir. (Fenz, 2008). Ekonomik açıdan bakıldığında İESS mesnet sistemi ile ÜESS mesnet sistemi arasında, ebatlar da göz önüne alındığında fark edilebilir bir fiyat farkı vardır.

1.7.1. ÜESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi

Fenz (2008), ÜESS mesnet sisteminin kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisinin işleyişi esas olarak Fenz ve Constantinou (2008b)’ye dayanmaktadır. Şekil 1.35’te çeşitli aşamalarda ÜESS mesnedinin en kesitleri görülmektedir.



Şekil 1.37. ÜESS mesnet sisteminin çeşitli aşamalarda hareket durumları

Şekil 1.37a mesnedin sıfır yerdeğiştirmesini yani merkezlenmiş durumunu, Şekil 1.37b servis yükleri durumunda içerideki sarkaç hareketini, Şekil 1.35c temel tasarım deprem seviyesinde alttaki sarkaç hareketini ve şekil 1.37d maksimum güvenilir depremde üstteki sarkaç hareketini göstermektedir.

Şekil 1.36’da verilen adlandırmalara dayanarak ÜESS mesnet sistemi aşağıda verilen bilgileri dikkate alarak yapılandırılır.

- Dış yüzeyler için büyük ve eşit eğrilik yarıçapları ve iç yüzeyler için küçük ve eşit eğrilik yarıçapları kullanılır. Yani $R_{eff2} = R_{eff3} \leq R_{eff1} = R_{eff4}$. Bu şekilde olması durumunda uygun sürtünme katsayıları ile birleştirildiği zaman hareket süresince rijitlikte istenilen sonuçlar elde edilir. Bu eğrilik yarıçapları farklı da olabilir; ancak denklemleri çıkartabilmek için eşit alınmalıdır. Üretim kolaylığı için çoğu durumlarda bu eğrilik yarıçapları eşit alınır.

- Mesnedin yüksek rijitlik sergilemesi için sürtünme katsayıları kullanılmaktadır. Başlangıç olarak, düşük sürtünme seçildiğinde rijitlik azalır. Bunun sonucu olarak

yerdeğiştirme artar ve sürtünme katsayısı biraz daha arttırılır. Bu durum, $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$ verilen sürtünme katsayıları sıralaması kullanılarak elde edilir.

- Kayıcı, yerdeğiştirme sınırlayıcısına 2 ve 3 yüzeyinden evvel 1 ve 4 yüzeyinde temas etmesi gerekir. Hareketin 1 ve 4 yüzeyinden önce 2 ve 3 yüzeyinde gerçekleşmesi sağlanır. Buda $F_{f1} < F_{dr2}$ ve $F_{f4} < F_{dr3}$ sağlandıkça gerçekleşir. Yerdeğiştirme açısından bu durum $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ ve $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$ sağlandıkça gerçekleşir.

- $F_{f4} < F_{dr1}$ olduğu durumda, herhangi bir yüzeyde gerginleşme başlamadan önce sürtünmenin en yüksek olduğu yüzeyde kaymanın başlaması gerekir. Yerdeğiştirme açısından bu durum $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{eff1}$ sağlanarak yerine getirilir. Bu olgu, mesnedin gerginleşip yumuşaması ve tekrar gerginleşmesi durumundan kaçınmak için sağlanır. Bu durum, eğer $F_{f4} > F_{dr1}$ olur ise ortaya çıkar. Mesnet, 1 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde gerginleşme, kayma 4 yüzeyinde başladığı zaman gevşeme ve sonra tekrar 4 yüzeyi yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde gerginleşmek ister.

Alınan bu yaklaşımlarla varsayımları kullanarak en genel yapılanış biçiminde kuvvet-yerdeğiştirme formülasyonları elde edilir. Bu varsayımları kullanarak ÜESS mesnedinin 5 farklı durumu incelenir (Fenz, 2008; Fenz ve Constantinou, 2008b)

Kayma durumu 1: Kayma sadece 2 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir.

Kayma durumu 2: 2 yüzeyinde hareket durur ve kayma, 1 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir.

Kayma durumu 3: Hareket 2 ve 3 yüzeyinde durur kayma 1 ve 4 yüzeyinde gerçekleşir.

Kayma durumu 4: Kayıcı 1 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde 3 yüzeyinde hareketsizlik devam eder kayma 2 ve 4 yüzeyinde gerçekleşir.

Kayma durumu 5: Kayıcı 1 e 4 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısına dayanır ve kayma 2 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir.

1.7.1.1. ÜESS’de Kayma Durumu 1

Kayma durumu 1, kaymanın yalnız 2 ve 3 yüzeylerinde olduğu durumdur. Uygulanan yatay kuvvet sürtünmenin küçük olduğu 2 ve 3 yüzeylerindeki sürtünme kuvvetine eşit ve bu kuvveti geçtiğinde, yani $F \geq F_{f2} = F_{f3}$ olduğunda, 2 ve 3 yüzeylerinde hareket başlar.

2 ve 3 yüzeyindeki hareket durumu göz önüne alınırsa düşey ve yatay yöndeki dengelerden aşağıdaki denklem (1.34) ve (1.35) elde edilir.

$$S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (1.34)$$

$$F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (1.35)$$

Burada, S_1 1 nolu plaka ile 2 nolu plaka arasındaki normal kuvvet; S_2 2 nolu plaka ile rijit kayıcı arasındaki normal kuvvet; θ_2 ise 2 nolu plaka ile rijit kayıcı arasındaki düşey açıdır. Diğer parametreler daha önceden tanımlanmıştır.

1 nolu kayma plakasındaki dengelerden aşağıdaki denklem (1.36) ve (1.37) elde edilir.

$$F = F_1 \quad (1.36)$$

$$W = S_1 \quad (1.37)$$

Burada, F uygulanan yatay kuvvettir. Geometriden 2 yüzeyindeki göreceli yerdeğiştirme (u_2) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u_2 = R_{eff2} \sin \theta_2 \quad (1.38)$$

(1.34) ve (1.38) denklemleri birleştirilip ve $\cos \theta_2 \cong 1$ olarak göreceli yerdeğiştirme u_2 , etkili yarıçap R_{eff2} 'ye kıyasla epeyce küçük olduğu varsayılırsa aşağıdaki denklem (1.39) elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2} \quad (1.39)$$

Zayas vd.'e (1987) göre, (1.34) ve (1.39) denklemleri geleneksel TESS mesnet sisteminin denge denklemleridir (Fenz, 2008).

4 nolu kayma plakası ve 3 nolu kayma plakası göz önüne alınıp aynı dengelerden 3 yüzeyi için aşağıdaki denklem (1.40) elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}3}} u_3 + F_{f3} \quad (1.40)$$

Kayma durumu 1 boyunca kuvvet–toplam yerdeğiştirme ilişkisi denklem (1.39) ve (1.40) birleştirilerek elde edilir. Toplam yerdeğiştirme u , $u_1 = u_4 = 0$ olduğu için u_2 ve u_3 yerdeğiştirmelerinin toplamına eşittir. Kuvvet-toplam yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem (1.41) ile elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f2} R_{\text{eff}2} + F_{f3} R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} \quad (1.41)$$

1.7.1.2. ÜESS’de Kayma Durumu 2

$F = F_{f1}$ olduğu zaman 1 yüzeyinde hareket başlar ve kayma durumu 2 başlamış olur. Aşağıdaki denklem (1.42) ile verilen u^* yerdeğiştirmesinde değişme oluşur.

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{\text{eff}2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{\text{eff}3} \quad (1.42)$$

Denklem (1.42), $F = F_{f1}$ olduğu anda yerdeğiştirme nedeniyle denklem (1.41)’i çözerek elde edilir. Alt içbükey plakaya göre alt kayar plakanın dönmesi θ_1 ve alt kayar plakaya göre rijit kayıcının dönmesi θ_2 ’dir. Açılar bu yolla tanımlandığı zaman göreceli yerdeğiştirme μ_1 ve μ_2 aşağıdaki denklem (1.43) ve (1.44) gibi olur.

$$u_1 = R_{\text{eff}1} \sin \theta_1 \quad (1.43)$$

$$u_2 = R_{\text{eff}2} \sin \theta_2 \quad (1.44)$$

TESS mesnet sistemin denge denklemlerinden 1 yüzeyindeki harekete hükmeden denklem (1.45)'deki ilişki elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} u_1 + F_{f1} \quad (1.45)$$

Rijit kayıcının boyutu küçük olmasına rağmen 1 yüzeyinde kayma oluşuyor iken alttaki kayma tabakasındaki dönmenin davranış üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu görülür. Rijit kayıcının düşey yönde yaptığı açısı, θ_1 ve θ_2 'nin toplamına eşittir. 2 nolu kayma plakasındaki yatay ve düşey dengelerden aşağıdaki denklem (1.46-1.47) elde edilir.

$$S_1 \cos \theta_1 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin \theta_1 = 0 \quad (1.46)$$

$$S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \sin \theta_1 - F_{f1} \cos \theta_1 = 0 \quad (1.47)$$

(1.43) ve (1.47) denklemlerini kullanarak $\cos \theta_1 \cong \sin \theta_1$ ve $\sin \theta_1 \times \sin \theta_2 \cong 0$ olması suretiyle θ_1 ve θ_2 'yi çok küçük varsayarak 2 yüzeyi için kuvvet aşağıdaki denklem (1.48)'deki gibi elde edilir.

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{\text{eff}1}} + \frac{u_2}{R_{\text{eff}2}} \right) + F_{f2} \quad (1.48)$$

Denklem (1.45)'ü denklem (1.48)'de yerine koyarsak aşağıdaki denklem (1.49) elde edilir.

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2) R_{\text{eff}2} \quad (1.50)$$

Hareket, durum 1'den durum 2'ye geçtiği zaman büyüklüğün u_2 değerine eşitliği ile 2 yüzeyindeki yerdeğiştirilmenin sabit olduğunu denklem (1.49) gösterir. Bunun anlamı anlık kayış 2 yüzeyinde durur 1 yüzeyinde başlar.

Kayma durumu 1 ve 2'de 4 nolu kayma plakası ile 3 nolu kayma plakası arasında u_3 yerdeğiştirme artışından dolayı θ_3 açısının daha büyük olmasından başka bir fark yoktur. Bundan dolayı 4 yüzeyinde kayma hareketi olmaz ve denklem (1.40) 3 yüzeyindeki harekette geçerli olmaya devam eder. Böylece kayma sadece 1 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir. Kayma durumu 2 için kuvvet-toplam yerdeğiştirme ilişkisi denklem (1.40), (1.45) ve (1.48)'ye dayanarak aşağıdaki denklem (1.50) olarak elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} \quad (1.50)$$

1.7.1.3. ÜESS'de Kayma Durumu 3

$F = F_{f4}$ olduğu zaman 4 yüzeyinde hareket başlar ve kayma durumu 3 başlamış olur. Aşağıdaki denklem (1.51) ile verilen u^{**} yerdeğiştirmesi oluşur.

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}) \quad (1.51)$$

Denklem (1.51), $F = F_{f4}$ olduğu zaman yerdeğiştirme nedeniyle denklem (1.50)'u çözerek elde edilir. u_1 , u_2 yerdeğiştirmeleri ve θ_1 , θ_2 açıları durum 2 de belirlenmişti. 3 nolu kayma plakasının 4 nolu kayma plakasına göre dönme açısı θ_4 ve 3 nolu kayma plakasının rijit kayıcıya göre dönme açısı θ_3 'tür. Açılar bu yolla tanımlandığı zaman göreceli yerdeğiştirme u_3 ve u_4 aşağıdaki denklem (1.52) ve (1.53) olarak elde edilir.

$$u_3 = R_{\text{eff}3} \sin \theta_3 \quad (1.52)$$

$$u_4 = R_{\text{eff}4} \sin \theta_4 \quad (1.53)$$

Mesnedin alt parçaları için durum 2 ve durum 3'te u_1 yerdeğiştirmesindeki artış hariç hiçbir değişiklik yoktur. Bundan dolayı 1 yüzeyindeki harekette denklem (1.45) ve 2 yüzeyindeki harekette denklem (1.48) geçerliliğini korur. 4 nolu kayma plakası ile 3 nolu

kayma plakası arasındaki yatay ve düşey denge denklemlerinden 3 ve 4 yüzeyi için kuvvet sırasıyla aşağıdaki denklem (1.54) ve (1.55) olarak elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}4}} + F_{f4} \quad (1.54)$$

$$F = W \left(\frac{u_3}{R_{\text{eff}3}} + \frac{u_4}{R_{\text{eff}4}} \right) + F_{f3} \quad (1.55)$$

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3) R_{\text{eff}3} \quad (1.56)$$

Denklem (1.56), 4 yüzeyindeki kayma başlar başlamaz 3 yüzeyinde kaymanın durduğunu gösteriyor. Bu, $F = F_{f4}$ olduğu zaman u_3 yerdeğiştirmesi nedeniyle denklem (1.40) çözülerek sağlanır. 1 ve 4 yüzeylerindeki kayma, kayma durumu 3 için toplam-kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi (1.45), (1.48), (1.54) ve (1.55) denklemlerini birleştirerek aşağıdaki denklem (1.57) olarak elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3} + F_{f4}(R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3})}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} \quad (1.57)$$

1.7.1.4. ÜESS'de Kayma Durumu 4

Geniş yerdeğiştirmelerdeki ÜESS mesnedinin gerginleşme davranışı geniş etkin yarıçaplı yüzeylerde hareketi durdurarak ve daha küçük etkin yarıçaplı yüzeylerde hareketin oluşmasını zorlayarak başarılır. Kayma durumu 4, hareketin 2 ve 4 yüzeylerinden 1 ve 4 yüzeylerine geçmesiyle başlar. Bu durum yüzey 1'deki yerdeğiştirme sınırlayıcısı ile temas olunca gerçekleşir. Bu temasta 1 yüzeyindeki yerdeğiştirme $u_1 = d_1$ olur ve yatay kuvvet $F_{\text{dr}1}$ aşağıdaki denklem (1.58)'den elde edilir.

$$F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \quad (1.58)$$

Kayma durumları arasındaki toplam yerdeğiştirmede, aşağıdaki denklem (1.59) ile verilen u_{dr1} geçişi gerçekleşir.

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (1.59)$$

Denklem (1.59), $F = F_{dr1}$ olduğu zaman u yerdeğiştirmesi nedeniyle denklem (1.60) çözümlenerek elde edilir.

Yerdeğiştirme sınırlayıcısı 1 yüzeyindeki kayıcı ile temas ettiğinde kayıcı üzerinde, ek bir kuvvet olan F_{r1} oluşur. Yerdeğiştirme sınırlayıcısının rijit olduğu varsayılarak aşağıdaki denklem (1.60)'taki kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi 1 yüzeyindeki harekete hükmettiği söylenir.

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{r1} + F_{r1} \quad (1.60)$$

1 yüzeyinde ek bir yerdeğiştirme olmaz ve uygulanan yatay kuvvet (F) artmasıyla sınırlayıcıdaki F_{r1} kuvvetinde artış gerçekleşerek denge korunmuş olur. 1 ve 2 nolu kayma plakası göz önüne alınarak 2 yüzeyindeki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem (1.61) ile elde edilir.

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \frac{u_2}{R_{eff1}} \right) + F_{r2} \quad (1.61)$$

Yerdeğiştirme sınırlayıcısı 1 yüzeyi ile temas ettiğinde 2 yüzeyinde hareketin devam ettiği yukarıdaki denklem (1.61)'tan görülmektedir. Denklem (1.47), $d_1 = u_1$ olduğunda denklem (1.61) gibi olur. Üst yüzeylerde bir değişiklik olmadığından dolayı denklem (1.55) ve (1.54) sırasıyla 3 ve 4 yüzeyinde geçerliliğini korur. Bu nedenle 2 ve 4 yüzeyinde kayma ile oluşan toplam kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem (1.62) ile elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{r1} \quad (1.62)$$

1.7.1.5. ÜESS'de Kayma Durumu 5

2 ve 4 yüzeyindeki kayma hareketi 2 ve 3 yüzeyine geçtiği zaman kayma durumu 5 başlar. Bu durum yerdeğiştirme sınırlayıcısı 4 yüzeyi ile temas ettiğinde gerçekleşir. (Bu durum daha da sertleşmeye eşlik eder). Durum 4'den durum 5'e geçiş noktasında, 4 yüzeyindeki göreceli yerdeğiştirme $u_4 = d_4$ olduğunda yatay kuvvet F_{dr4} aşağıdaki denklem (1.63) ile verilmektedir.

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (1.63)$$

Kayma durumları arasındaki geçişlerde u_{dr4} toplam yerdeğiştirmesi ortaya çıkar ve aşağıdaki denklem (1.64) ile gösterilir.

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] R_{eff2} + R_{eff4} \quad (1.64)$$

4 ve 3 nolu kayma plakalarındaki dengeden 4 ve 3 yüzeyleri için yatay kuvvetler sırasıyla aşağıdaki denklem (1.65) ve (1.66) ile elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (1.65)$$

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \frac{u_3}{R_{eff3}} \right) + F_{f3} \quad (1.66)$$

Mesnedin alt kısmında olduğu gibi denklem (1.66), anlık temasın 4 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısıyla yapıldığında kaymanın 3 yüzeyinde kaldığı yerden devam ettiğini gösterir. Daha aşağıdaki tabakada değişen bir şey olmaz, 1 yüzeyindeki yerdeğiştirme sınırlayıcısındaki kayıcı mesnet ile birlikte hareket 2 yüzeyinde hala oluşmaya devam eder. 1-4 yüzeylerindeki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri birleştirilirse aşağıdaki denklem (1.67) elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u - u_{\text{dr}4} + \frac{W}{R_{\text{eff}4}} d_4 + F_{f4} \quad (1.67)$$

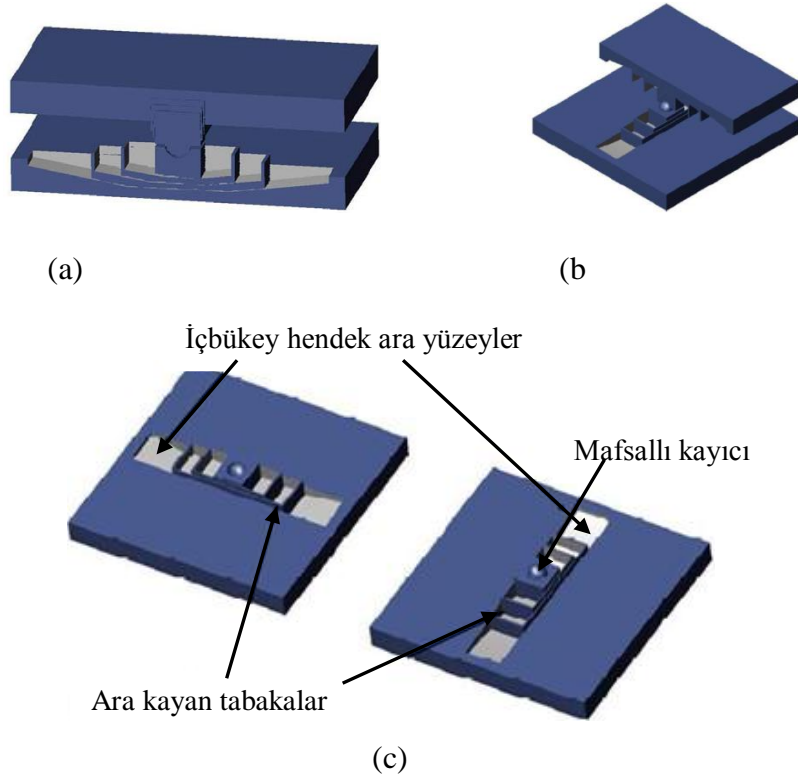
Tablo 1.1’de durum 1-5’deki ÜESS mesnet sisteminin davranışı özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Durum 1-5'deki ÜESS mesnet sisteminin davranışı

DURUM	Durumun tarifi	Kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi
1	Kayma sadece 2 ve 3 yüzeylerinde olmaktadır.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}}$ $F = F_1 \text{ ve } u = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff}2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{\text{eff}3} \text{ olduğu sürece geçerlidir.}$
2	Kayma hareketi 1 ve 3 yüzeylerinde başlar, 2 yüzeyinde durur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}}$ $F = F_4 \text{ ve } u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}) \text{ olduğu sürece geçerlidir.}$
3	Hareket 2 ve 3 yüzeylerinde durur, 1 ve 4 yüzeylerinde olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3} + F_{f4}(R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3})}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}}$ $F = F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \text{ ve } u = u_{\text{dr}1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff}4}}{R_{\text{eff}1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}) \text{ olduğu}$ <p>sürece geçerlidir.</p>
4	Kayıcılı 1 yüzeyindeki sınırlayıcıyla temas eder; 3 yüzeyinde hareket durmaya devam eder, 2 ve 4 yüzeylerinde kayma olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}4}} (u - u_{\text{dr}1}) + \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1}$ $F = F_{\text{dr}4} = \frac{W}{R_{\text{eff}4}} d_4 + F_{f4} \text{ ve } u = u_{\text{dr}4} = u_{\text{dr}1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{\text{eff}4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{\text{eff}1}} + \mu_1 \right) \right] R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}4}$ <p>olduğu sürece geçerlidir.</p>
5	Kayıcılı 1 ve 4 yüzeylerindeki sınırlayıcılara dayanır. Kayma 2 ve 3 yüzeylerinde olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u - u_{\text{dr}4} + \frac{W}{R_{\text{eff}4}} d_4 + F_{f4}$ $F = F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \quad u = u_{\text{dr}1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff}4}}{R_{\text{eff}1}} \right) - \mu_4 - \mu_1 R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}$
Varsayımlar: 1- $R_{\text{eff}1} = R_{\text{eff}4} \gg R_{\text{eff}2} = R_{\text{eff}3}$, 2- $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$ 3- $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{\text{eff}1}$ 4- $d_4 > (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff}2}$ 5- $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{\text{eff}3}$		

1.8. Çok Hendekli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi

Sismik izolasyon teknikleri var olan ve yapılacak olan yapıları depremin zararlı etkilerinden korumak için geleceği parlak bir teknoloji olarak bilinmektedir. Geliştirilen yeni tekniklerden biri de Çok Hendekli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet (ÇHSSM) sistemidir. Tsai vd., (2006), X ve Y yönlerinde yerleştirilmiş bir eğrisel içbükey hendek, bunun içine yerleştirilmiş birkaç tane ara kayma plakaları ve konkav hendek yüzeylerin arasına yerleşmiş mafsallı kayıcıdan oluşan bir sistem önermişlerdir (Şekil 1.36). ÇHSSM sisteminin iki yöndeki sahip olduğu doğal periyot ve sönüm özellikleri farklı doğal periyot göstermesine olanak verir. Bu sistem köprü ve binalarda uygulanabilir. Ayrıca ara kayan tabakaların özellikleri ele alınarak ÇHSSM sisteminin karakteristiğini incelemek suretiyle matematiksel formülasyonlar türetilmiştir. Bu formülasyonlar, birden çok kayma ara yüzeyi ile birlikte ÇHSSM sisteminin doğal periyot ve sönüm değerlerinin depremler boyunca durmadan değişebildiğini ve kontrol edilebildiğini göstermiştir. Her iki yönde kayan ara yüzeylerdeki sürtünme katsayıları ve yerdeğiştirme kapasiteleri de birbirinden farklı olabilir. Bu da tasarlayan mühendise farklı kombinasyon fırsatları sunmaktadır.



Şekil 1.38. ÇHSSM sisteminin en kesiti (a) sökülüş hali (b) açılmış görünümü (c)

2.YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Depremlerin etkileri, dünyada ve özellikle ülkemizdeki yakın zamanlarda gerçekleşen depremlerden bilinmektedir. Can ve mal kaybının istenmeyen düzeyde olduğu açıktır. Bu şiddetli depremlerden sonra yapılarda hasarın en az derecede gerçekleşip, can kaybı olmaması beklenir. Tasarımı yapacak mühendisler bu durumları göz önüne alarak tasarıma başlamalıdır.

Yapılan bu çalışmada, yapıyı depremin yıkıcı etkilerinden korumak için son yıllarda sıkça kullanılan sismik izolasyon sistemi uygulamalarından ÜESS mesnet sistemi ele alınmıştır. Bu sistem, 8 katlı düzlem çerçeveye ve Trabzon-Giresun karayolunda yer alan Gülburnu Köprüsü'ne uygulanmıştır. Düzlem çerçeve modeli üzerinde yapılan çalışmada, elde edilen dinamik tepkiler karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak ele alınan düzlem çerçevede zemin-yapı etkileşimi içeren durumlarda yapılan analizler de dikkate alınarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Gülburnu Köprüsü, tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnedi kullanılan sismik izolasyonlu bir karayolu köprüsüdür. Bu köprünün izolasyonsuz ve izolasyonlu durumları karşılaştırılmıştır. İzolasyonlu durumda mevcut köprüde kullanılan TESS mesnet ile ÜESS mesnet olması durumları karşılaştırılmıştır.

Düzlem çerçeve modeli ve Gülburnu Köprüsünün üç boyutlu modeli SAP2000 programında (Computers and Structures Inc. 2007) kullanılarak hazırlanmıştır.

SAP2000'de yapılan bu uygulamalarda, zaman tanım alanında analiz yöntemi uygulanmış olup iki ayrı deprem kaydı kullanılmıştır. Bunlar, PEER Strong veri tabanından alınan 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Gebze istasyonu kaydının GBZ000 bileşeni ile 13 Mart 1992 Erzincan depremi Erzincan İstasyonu kaydının ERZ-EW ve ERZ-NS bileşenleridir.

Uygulamada kullanılan ÜESS mesnet sistemi, yeni bir mesnet sistemi olduğundan mevcut yapısal analiz programlarında henüz bulunmamaktadır. Bu nedenle üç tane tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TESS) mesnet sisteminin seri olarak düzenlenmesi ile oluşturulmuştur. Ancak ÜESS mesnet sisteminin davranışı TESS mesnetine benzemesine

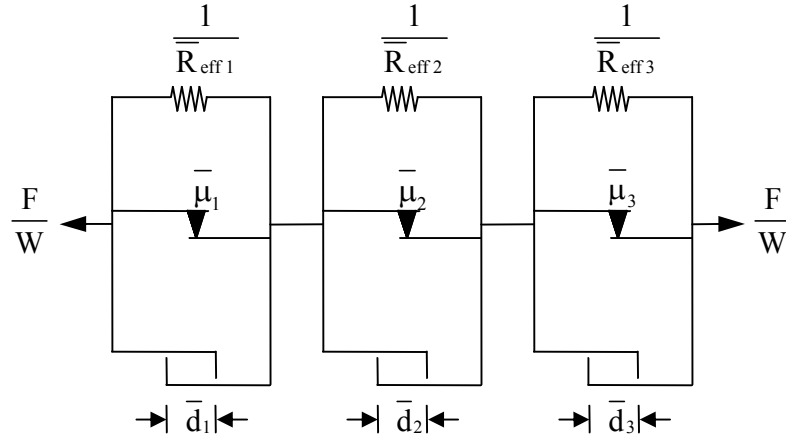
rağmen, TESS mesnet elemanlarının seri olarak bağlanması ile tam olarak temsil edilememektedir. Bu nedenle modelde rijit kiriş (RK) ve boşluk elemanları (BE) da kullanılmıştır. Elde edilen bu modele “seri model” adı verilmiştir (Şekil 2.1). Seri model yardımıyla ÜESS mesnet sistemine ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi doğru bir şekilde elde edilmeye çalışılmıştır.

2.2. Seri Model

ÜESS mesnet sistemini tam olarak modellemek için mevcut yapısal analiz programlarında doğrusal olmayan elemanlar mevcut değildir. Bu nedenle, ÜESS mesnet sistemini temsil etmek için mevcut doğrusal olmayan elemanların kullanılmasıyla oluşturulan seri modelden faydalanılır (Fenz ve Constantinou, 2008b). Tsai’e (2002) göre, birden fazla sarkaç sistemi ile temsil edilen birden fazla eğrisel yüzeye sahip sürtünmeli sarkaç sistemler diğer seri bağlı olarak temsil edilebilir (Tsai ve Chang Lin, 2009). Fenz ve Constantinou (2008b), bu konuda deneysel ve sayısal çalışmalarla bu seri modelin araştırmalarını yayınlamışlardır.

Seri model, mevcut yapısal analiz programlarında kullanılabilen TESS mesnet sistemine uyan doğrusal olmayan elemanlardan oluşur. ÜESS mesnet sistemi, üç tane TESS mesnet sistemi gibi düzenlenen seri modele tam olarak benzememesine rağmen, benzer kuvvet-yerdeğiştirme özelliği gösterir.

Yukarıda bahsedilen seri modeli oluşturan TESS mesnet sistemi SAP2000 programında mevcuttur. Bu nedenle, seri modelin oluşturulması için SAP2000 programı kullanılmıştır. Ancak seri model, ÜESS mesnetinin davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Fakat kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin doğru bir şekilde elde edilmesine imkân vermektedir. Gerçek ÜESS mesnetinde kayma hareketi, önce en içteki 2 ve 3 yüzeylerinde gerçekleşir, sonra en dıştaki 1 ve 4 yüzeylerinde kayma başladığı zaman 2 ve 3 yüzeylerinde kayma durmaktadır. Daha sonra dıştaki içbükey tabakalar yerdeğiştirme sınırlayıcısına kadar 2 ve 3 yüzeyinde kayma tekrar başlar. Kullanılan seri modelden bu davranışları yapması beklenir. Sadece, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisini doğru olarak temsil etmesi yeterli olmaktadır. Zaten Fenz ve Constantinou (2008b), ÜESS mesnetinin kayma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, ÜESS mesnetini temsil eden seri modelin kullanılmasını içeren sayısal ve deneysel çalışmaların yaklaşık olarak aynı kuvvet-yerdeğiştirme eğrisini verdiğini tespit etmişlerdir.

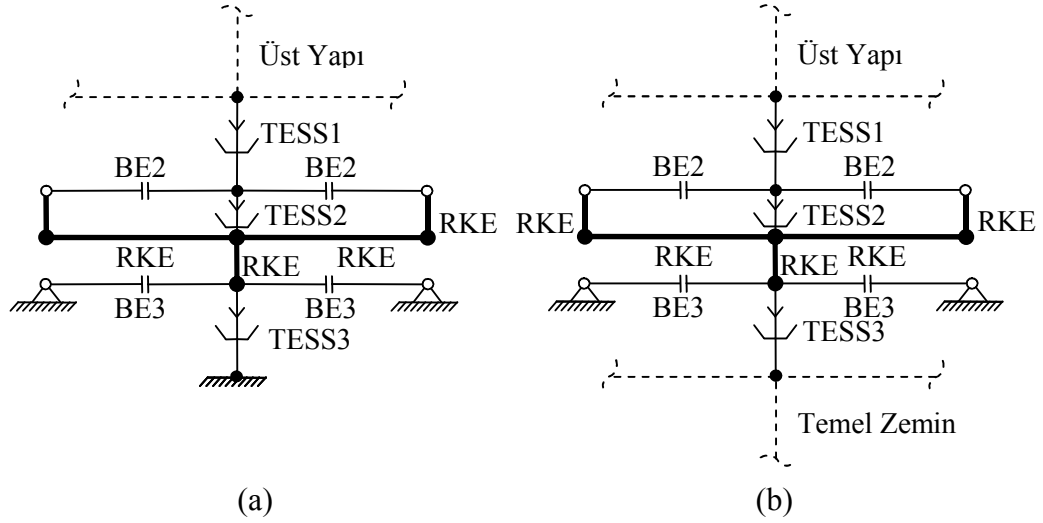


Şekil 2.1. ÜESS mesnet modelini temsil eden seri modeldeki üç tane TESS mesnedi

Bu modelde, $1/\bar{R}_{eff i}$ i. etkili eğrilik yarıçapına dayanan yay rijitliğini; $\bar{\mu}_i$ hıza bağlı sürtünme katsayısını ve \bar{d}_i boşluk elemanın yerdeğiştirmesini verir. Şekil 2.1’de kullanılan gösterimler seri modeldeki parametreleri temsil eder ve bu gösterimlerin seri modelde olan karşılıkları kullanır. Diğer bir deyişle, standart gösterim ÜESS mesneti ile ilgili tepkileri ve parametreleri simgelemek için kullanılır. Yatay kuvvet, sürtünme kuvvetini geçtiği zaman i. elemanın yerdeğiştirmesi başlar. Her bir eğrisel yüzey için sürtünme kuvveti $\bar{F}_{fi} = \bar{\mu}_i W$ denklemi ile elde edilir. Burada W mesnet sistemi üzerine uygulanan düşey kuvvettir. i. elemanın yerdeğiştirme kapasitesi \bar{d}_i ’ye eşit olduğu zaman i. elemanın hareketi durur. Uygulanan yatay kuvvet aşağıdaki denklem (2.1)’de ortaya çıkar.

$$F_i = \frac{W}{\bar{R}_{eff i}} \bar{d}_i + \bar{\mu}_i W \quad (2.1)$$

Seri model düşünülerek elde edilen kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 2.1’de tasvir edilmiştir. Bu model ÜESS mesnet sisteminin gerçek kuvvet-yerdeğiştirmesine yakın bir davranış sergilemektedir.



Şekil 2.2. ÜESS mesnedinin SAP2000'deki yapı-zemin etkileşim içermeyen (a) ve içeren (b) seri modeldeki gösterimleri

Şekil 2.2'de üç tane tek eğrilikli sürtümlü sarkaç (TESS) bağlantı elemanı, dört tane boşluk bağlantı elemanı (BE) ve beş tane rijit kiriş elemanlarından (RKE) oluşan düzeneğin SAP2000'de seri model olarak nasıl oluşturulacağı gösterilmiştir. Şekildeki düzeneğin yüksekliği gerçek izolatörün yüksekliğine eşittir. Bu gösterim 2 boyutlu analiz yapımında geçerlidir.

2.2.1. ÜESS Seri Modeli İçin Formüller

Önerilen seri model düzeneğinde, TESS1 bağlantı elemanı, içteki 2 ve 3 yüzeylerinin birleşmiş davranışını, TESS2 bağlantı elemanı dıştaki 1 yüzeyinin davranışını, TESS3 bağlantı elemanı ise dıştaki 4 yüzeyinin davranışını temsil eder. Mesnetlerin taşıdığı düşey yüklerde herhangi bir düzenleme olmadığı için her bir yüzeyde kaymanın tam olarak başlamasını sağlamak için sürtünme katsayılarında değişiklik yapılmamıştır. Yani denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\bar{\mu}_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (2.2)$$

$$\bar{\mu}_2 = \mu_1 \quad (2.3)$$

$$\bar{\mu}_3 = \mu_4 \quad (2.4)$$

Kayma durumu 1’de fiili olan davranış, sadece 2 ve 3 yüzeyinde olan kaymadır. Bu durumda kayma sadece TESS1 elemanında gerçekleşir. Bu kayma durumu boyunca rijitliği doğru bir şekilde modellemek için aşağıdaki denklem (2.5) gereklidir.

$$\bar{R}_{eff1} = R_{eff2} + R_{eff3} \quad (2.5)$$

Durum 2’deki kayma sadece 1 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir. Gerçek mesnette hareket 2 yüzeyinde durur ve anlık olarak 1 yüzeyinde başlar. Ancak seri model, hareket başka bir elemanda başlar başlamaz, bir eleman için hareket kesintisini durduramaz. Seri modeldeki TESS2 bağlantı elemanının etkili yarıçapı, mesnetin sergilediği gerçek rijitlik ve seri model tarafından verilen rijitlik ile eşitlenerek elde edilir. Bu durum aşağıdaki denklem (2.6)’da verilmiştir.

$$\frac{W}{\bar{R}_{eff1} + \bar{R}_{eff2}} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (2.6)$$

Denklem (2.5) ve (2.6)’yi birleştirerek TESS2 bağlantı elemanı için etkili yarıçap aşağıdaki denklem (2.7) olarak elde edilir.

$$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{eff3} \quad (2.7)$$

Kayma durumu 3’te gerçek davranış kaymanın sadece 1 ve 4 yüzeylerinde oluşmasıdır. Bu durumda hareket, 3 yüzeyinde durur ve anlık 4 yüzeyinde başlar. Seri modeldeki SS3 bağlantı elemanının etkili yarıçapı, mesnetin sergilediği gerçek rijitlik seri model rijitliğine eşitlenerek elde edilir. Bu durum aşağıdaki denklem (2.7)’de verilmiştir.

$$\frac{W}{\bar{R}_{eff1} + \bar{R}_{eff2} + \bar{R}_{eff3}} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} \quad (2.8)$$

Denklem (2.5), (2.7) ve (2.8) birleştirilerek TESS3 bağlantı elemanının etkili yarıçapı aşağıdaki denklem (2.9) ile elde edilir.

$$\bar{R}_{\text{eff}3} = R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3} \quad (2.9)$$

Seri modelde, ÜESS mesnet sisteminin gerçek kuvvet-yerdeğiştirme davranışının gerçekleştirilebilmesi için boşluk elemanları kullanılmaktadır. BE2 ve BE3'ün yerdeğiştirmeleri sırasıyla aşağıdaki denklem (2.10) ve (2.11) ile elde edilir.

$$\bar{d}_2 = \frac{R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}}{R_{\text{eff}1}} d_1 \quad (2.10)$$

$$\bar{d}_3 = \frac{R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}4}} d_4 \quad (2.11)$$

TESS1 elemanının yerdeğiştirme kapasitesi aşağıdaki denklem (2.12) ile elde edilir.

$$\bar{d}_1 = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) - (\bar{d}_2 + \bar{d}_3) \quad (2.12)$$

1 ve 4 yüzeylerindeki sürtünme katsayısının maksimum ve minimum değerleri arasındaki geçişi kontrol eden ve hıza bağlı olan a oran parametresi aşağıdaki denklem (2.13) ve (2.14) ile elde edilir. 1-4 yüzeylerindeki mevcut kayma için a oran parametresi 0,1s/mm olarak alınır.

$$\bar{a}_2 = \frac{R_{\text{eff}1}}{R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}} a_1 \quad (2.13)$$

$$\bar{a}_3 = \frac{R_{\text{eff}4}}{R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3}} a_4 \quad (2.14)$$

Seri modeldeki TESS1 bağlantı elemanı için a oran parametresi, 2 ve 3 yüzeylerindeki oran parametrelerinin toplamının yarısı olacak şekilde aşağıdaki denklem (2.15) ile elde edilir.

$$\bar{a}_1 = \frac{a_2 + a_3}{4} \quad (2.15)$$

Seri modele giriş parametreleri, yapının kesit özelliklerinden ve (2.2)-(2.15) denklemlerden elde edilir. Kesme deformasyonu, elemanın yüksekliğinin yarısında meydana gelir. Eleman kütlelerinin analiz sonuçlarına etki etmeyeceği söylenebilir; ancak bu unsur analizin etkinliği için gereklidir.

Elastisite modulünün mesnetin düşey rijitliğinin tam olarak temsil edilebilmesi için gerekli olduğu belirtilmektedir. Ancak düşey rijitlik çeliğin elastisite modulünün yarısına eşittir. Yani $E = 1,05 \times 10^8$ kN/m²'dir. Mesnet tam olarak bir metal parçası olmadığı için elastisite modülü gerçek durumun yaklaşık yarısı kadar azaltılmış olur. Böylece mesnetin düşey rijitliği aşağıdaki denklem (2.16) şeklinde gösterilebilir.

$$K_v = \frac{EA}{h} \quad (2.16)$$

Burada, A kayıcının alanı ve h mesnetin gerçek yüksekliğidir. Elastik rijitlik denklem (2.17)'ye eşittir.

$$K_i = \frac{\bar{\mu}_i W}{2Y} \quad (2.17)$$

Burada, $\bar{\mu}_i$ yüksek hızdaki hareket için i. yüzeydeki sürtünme katsayısını; W mesnetin taşıdığı aksenal yük ve Y akma yerdeğiştirmesidir. Akma yerdeğiştirmesi 1 mm olarak alınmaktadır.

Efektif rijitlik ise aşağıdaki denklem (2.18)'e eşittir.

$$K_{\text{eff}} = \frac{W}{R_{\text{eff}}} \quad (2.18)$$

Burada \bar{R}_{eff} , i. elemanın etkili yarıçapını gösterir.

Yavaş sürtünme ($f_{\text{yavaş}}$) katsayısı, hızlı sürtünme katsayısının ($f_{\text{hızlı}}$) yarısına eşittir.

2.3. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri

Bir sistemin dinamik hareket denklemi (Şimşek, 2010) kaynağında verilen notasyona bağlı kalarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} \quad (2.19)$$

Bu denklemde;

$[M]$; sistemin kütle matrisi,

$[C]$; sistemin sönüm matrisi,

$[K]$; sistemin rijitlik matrisi,

$\{U\}$; sistemin yer değiştirme vektörü,

$\{\dot{U}\}$; sistemin hız vektörü,

$\{\ddot{U}\}$; sistemin ivme vektörü,

$\{P\}$; dış yük vektörüdür.

2.3.1. Doğal Frekans ve Modların Hesabı

Sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için (2.19) hareket denklemi

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (2.20)$$

biçiminde yazılabilir. Bu denklemin çözümü

$$\{U\} = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (2.21)$$

şeklinde. Burada A ve B başlangıç şartlarından elde edilir. Bununla birlikte, α faz açısı; ω_n doğal açısal frekans ve $\{\phi\}$ hareketin genlik vektörü olmak üzere sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm

$$\{U\} = \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir. (2.22) denkleminde

$$\{\ddot{U}\} = -\omega_n^2 \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (2.23)$$

elde edilir. (2.22) ve (2.23) denklemleri (2.20) denkleminde yerine konursa

$$-\omega_n^2 [M] \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) + [K] \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) = \{0\} \quad (2.24)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse

$$([K] - \omega_n^2 [M]) \{\phi\} = \{0\} \quad (2.25)$$

Karakteristik Özdeğer Denklemi elde edilir. Bu denklemden titreşim elde edilebilmesi için $\{\phi\}$ 'nin sıfırdan farklı olması gerekir. Sıfırdan farklı bir matris ile bir vektörün çarpımlarının sıfır olmasının tek yolu, matrisin tersinin bulunamaması, yani bunun tekil bir matris olmasıdır. Bir matrisin tekil olabilmesi için ise, determinantının sıfır olması gerekmektedir. Buna göre;

$$|[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (2.26)$$

elde edilir. Burada $\omega_n^2 = \lambda$ alınırsa (2.26) denklemleri

$$|[K] - \lambda [M]| = 0 \quad (2.27)$$

şekline gelir. Bu denklemin titreşim analizinde çok önemli bir yeri vardır ve Özdeğer Denklemi veya Frekans Denklemi olarak adlandırılmaktadır. Bu denklemdeki determinant işlemi gerçekleştirilirse aşağıdaki gibi λ 'ya bağlı n. dereceden bir polinom elde edilir.

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (2.31)$$

$$\{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (2.32)$$

Mod vektörlerinin hesabında, elemanların oranı sabit kalmak üzere, değişik çözümler elde edilebilir. Mod şekilleri aynı olduğu halde farklı genlikler elde edilebilir. Bu keyfîlik bir normleştirme işlemi ile ortadan kaldırılabilir. Hesap kolaylığı bakımında genellikle bütün genlikler en büyük genlik esas alınarak normalize edilir. Bununla birlikte, diğer bir normleştirme işleminde ise, kütle matrisinin aynı mod vektörü ile sağ ve soldan çarpılarak sonucun birim olması sağlanır. Yani

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = 1 \quad (2.33)$$

şeklinde dir. Normleştirilmiş modlar;

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sqrt{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j}} \quad (2.34)$$

şeklinde elde edilir. Böylece modlar normleştirilir.

$$\{\phi\}_j = \begin{Bmatrix} \phi_{1j} \\ \phi_{2j} \\ \vdots \\ \phi_{ij} \\ \vdots \\ \phi_{nj} \end{Bmatrix} \Rightarrow \{\Phi\}_j = \begin{Bmatrix} \Phi_{1j} \\ \Phi_{2j} \\ \vdots \\ \Phi_{ij} \\ \vdots \\ \Phi_{nj} \end{Bmatrix}$$

j. mod vektörü

j. normleştirilmiş mod vektörü

Mod vektörlerinden oluşan matrise Modal Matris, normleştirilmiş mod vektörlerinden oluşan matrise de Normleştirilmiş Modal Matris adı verilir. n serbestlik dereceli bir sistem için modal matrisler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Modal matrix} & & \text{Normalleştirilmiş modal matrix} \\
 [\Phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1i} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2i} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{i1} & \phi_{i2} & \cdots & \phi_{ii} & \cdots & \phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{ni} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} & & [\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1i} & \cdots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2i} & \cdots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{i1} & \Phi_{i2} & \cdots & \Phi_{ii} & \cdots & \Phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \cdots & \Phi_{ni} & \cdots & \Phi_{nn} \end{bmatrix} \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \\
 \text{1.mod} & \text{2.mod} & \text{i.mod} & \text{n.mod} & & \\
 \text{Normalleştirme işleminin doğruluğu} & & & & &
 \end{array}$$

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (2.35)$$

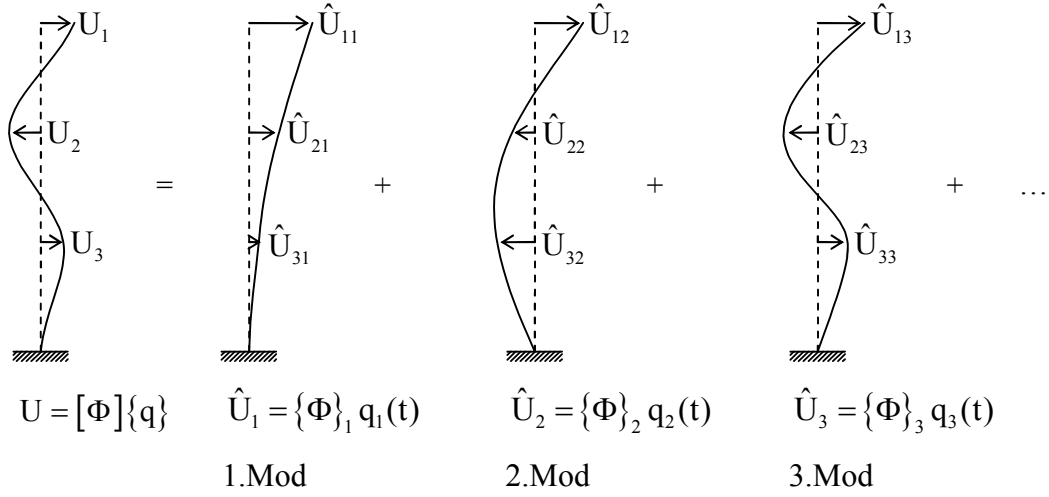
bağıntısıyla kontrol edilebilir. Burada $[I]$ birim matrisidir.

2.3.2. Mod Süperpozisyon Yöntemi

(2.19) denklemi ile verilen dinamik hareket denkleminin çözümünün

$$\{U\} = [\Phi] \{q\} \quad (2.36)$$

şeklinde olduğunu kabul edebiliriz. Burada; $[\Phi]$ normalleştirilmiş modal matris, $\{q\}$ modal koordinatlardır. (2.36) denklemi ile verilen çözüm, Şekil 2.3'deki gibi düşünülebilir.



Şekil 2.3. Mod süperpozisyon yöntemi

(2.36) denklemi açık olarak yazılırsa aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\{U\} = \{\Phi\}_1 q_1(t) + \{\Phi\}_2 q_2(t) + \{\Phi\}_3 q_3(t) + \dots + \{\Phi\}_n q_n(t) = \sum_{r=1}^n \{\Phi\}_r q_r(t) \quad (2.37a)$$

veya

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{21} \\ \Phi_{31} \\ \vdots \\ \Phi_{n1} \end{Bmatrix} q_1(t) + \begin{Bmatrix} \Phi_{12} \\ \Phi_{22} \\ \Phi_{32} \\ \vdots \\ \Phi_{n2} \end{Bmatrix} q_2(t) + \begin{Bmatrix} \Phi_{13} \\ \Phi_{23} \\ \Phi_{33} \\ \vdots \\ \Phi_{n3} \end{Bmatrix} q_3(t) + \dots + \begin{Bmatrix} \Phi_{1n} \\ \Phi_{2n} \\ \Phi_{3n} \\ \vdots \\ \Phi_{nn} \end{Bmatrix} q_n(t) \quad (2.37b)$$

veya matris formda

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \dots & \Phi_{1r} & \dots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \dots & \Phi_{2r} & \dots & \Phi_{2n} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} & \dots & \Phi_{3r} & \dots & \Phi_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \Phi_{n3} & \dots & \Phi_{nr} & \dots & \Phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix} \quad (2.37c)$$

Normalleştirilmiş modal matris

Modal koordinatlar

(2.36) nolu denklem ve onun birinci ve ikinci türevleri (2.19) nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$[M][\Phi]\{\ddot{q}\} + [C][\Phi]\{\dot{q}\} + [K][\Phi]\{q\} = \{P\} \quad (2.38)$$

elde edilir. (2.38) denkleminin her iki tarafı $\{\Phi\}_r^T$ ile çarpılırsa;

$$\{\Phi\}_r^T [M][\Phi]\{\ddot{q}\} + \{\Phi\}_r^T [C][\Phi]\{\dot{q}\} + \{\Phi\}_r^T [K][\Phi]\{q\} = \{\Phi\}_r^T \{P\} \quad (2.39)$$

elde edilir. (2.30), (2.31) ve (2.32) denklemleriyle verilen titreşim modlarının ortogonalite şartı dikkate alınır (2.39) denkleminin şu hale gelir;

$$\{\Phi\}_r^T [M]\{\Phi\}_r \ddot{q}_r(t) + \{\Phi\}_r^T [C]\{\Phi\}_r \dot{q}_r(t) + \{\Phi\}_r^T [K]\{\Phi\}_r q_r(t) = \{\Phi\}_r^T \{P\} \quad (2.40)$$

veya

$$M_r \ddot{q}_r(t) + C_r \dot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = P_r \quad (2.41)$$

Burada;

$$M_r = \{\Phi\}_r^T [M]\{\Phi\}_r \quad ; r. \text{ Genelleştirilmiş kütle,}$$

$$C_r = \{\Phi\}_r^T [C]\{\Phi\}_r \quad ; r. \text{ Genelleştirilmiş sönüm,}$$

$$K_r = \{\Phi\}_r^T [K]\{\Phi\}_r \quad ; r. \text{ Genelleştirilmiş rijitlik,}$$

$$P_r = \{\Phi\}_r^T \{P\} \quad ; r. \text{ Genelleştirilmiş kuvvet olarak adlandırılmaktadır.}$$

(2.41) denkleminin, açısal frekansı $\omega_r = \sqrt{\frac{K_r}{M_r}}$ olan tek serbestlik dereceli bir sistemin

hareket denkleminin haline gelir. (2.41) denkleminin her iki tarafı M_r 'ye bölünecek olursa

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r \omega_r \dot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = \frac{P_r}{M_r} \quad (2.42)$$

elde edilir. $\{\Phi\}_r$ normleştirilmiş mod olduğuna göre $\{\Phi\}_r^T [M]\{\Phi\}_r = 1$ demektir. Yani

$M_r = 1$ olur. Buna göre (2.41) denkleminin

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r \omega_r \dot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = P_r \quad (2.42)$$

haline gelir. Burada; ω_r r. titreşim moduna karşılık gelen açısal frekans ve $q_r(t)$; r. titreşim moduna ait modal koordinatlardır.

Özetlenecek olursa; n serbestlik dereceli bir sistemin n tane açısal frekansı (ω_n) mevcuttur. Her bir açısal frekans için (2.42) denklemi çözülerek $q(t)$ modal koordinatlar elde edilir. Daha sonra (2.36) denklemi yardımıyla genel çözüm elde edilir. Yani;

- ω_1 için $\{\Phi\}_1$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_1(t) + 2\xi_1 \omega_1 \dot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) = P_1$ denkleminin çözümünden $q_1(t)$ elde edilir.
- ω_2 için $\{\Phi\}_2$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_2(t) + 2\xi_2 \omega_2 \dot{q}_2(t) + \omega_2^2 q_2(t) = P_2$ denkleminin çözümünden $q_2(t)$ elde edilir.
- ω_3 için $\{\Phi\}_3$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_3(t) + 2\xi_3 \omega_3 \dot{q}_3(t) + \omega_3^2 q_3(t) = P_3$ denkleminin çözümünden $q_3(t)$ elde edilir.
- \vdots
- ω_n için $\{\Phi\}_n$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = P_n$ denkleminin çözümünden $q_n(t)$ elde edilir.

Modal koordinatlar bulunduktan sonra;

$$U_1(t) = \Phi_{11} q_1(t) + \Phi_{12} q_2(t) + \Phi_{13} q_3(t) + \dots + \Phi_{1n} q_n(t)$$

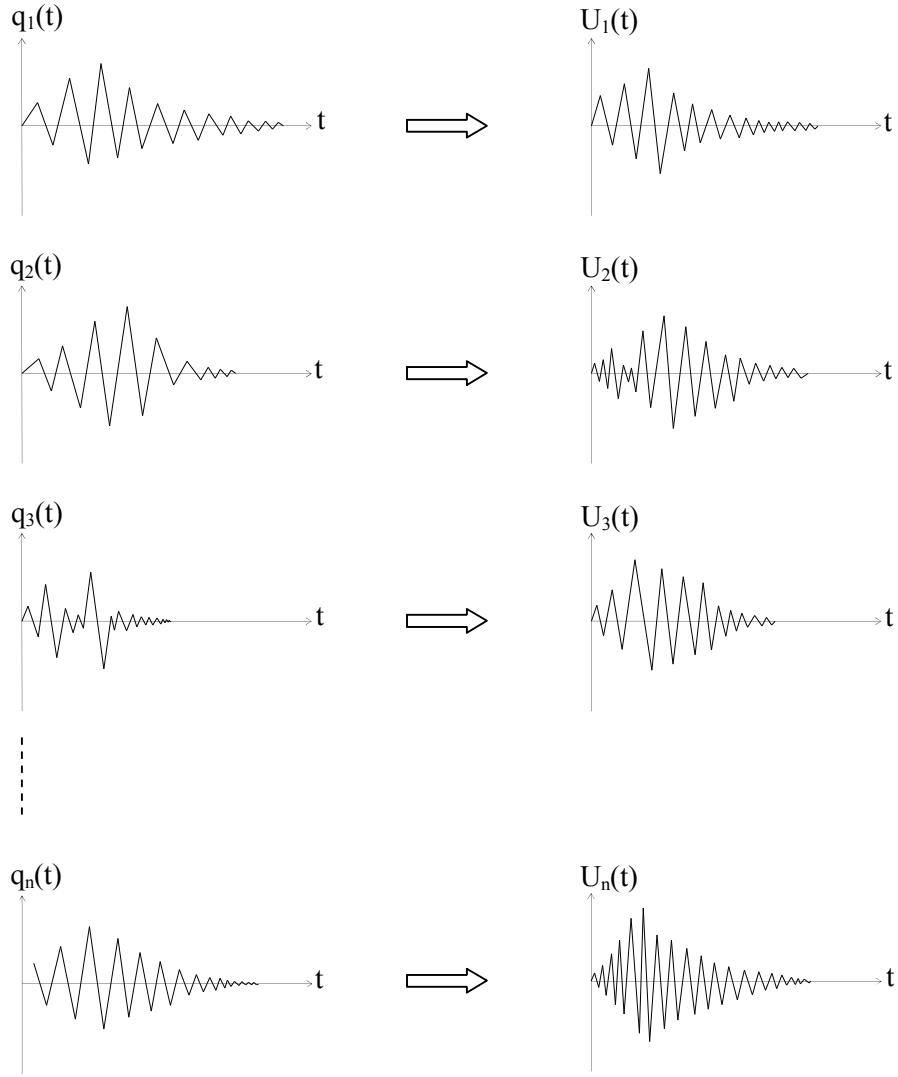
$$U_2(t) = \Phi_{21} q_1(t) + \Phi_{22} q_2(t) + \Phi_{23} q_3(t) + \dots + \Phi_{2n} q_n(t)$$

$$U_3(t) = \Phi_{31} q_1(t) + \Phi_{32} q_2(t) + \Phi_{33} q_3(t) + \dots + \Phi_{3n} q_n(t)$$

•

$$U_n(t) = \Phi_{n1} q_1(t) + \Phi_{n2} q_2(t) + \Phi_{n3} q_3(t) + \dots + \Phi_{nn} q_n(t)$$

veya kısaca 2.36) denklemiyle, yani $\{U\} = [\Phi]\{q\}$, genel çözüm elde edilir. Bu çözüm şematik olarak Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Mod süperpozisyon yönteminde modal koordinatlar ve çözüm

2.3.3. SAP2000’de Zaman Tanım Alanında Analiz

Doğrusal olmayan izolatör elemanlarını birleştiren Zaman Tanım alanında analiz yöntemi, en doğru analiz yöntemidir. İbrahimbegavich ve Wilson (1989); Wilson (1993), doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem doğrusal olmayan hızlı analiz metodunun bir uzantısıdır. Bu metot son derece etkili ve doğrusal elastik olan yapısal sistemler için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Fakat bu sistemler, doğrusal olmayan bağlantı elemanlarına sahiptir. Deprem yüküne maruz kalmış doğrusal olmayan bağlantı elemanına sahip doğrusal bir yapının dinamik denge denklemleri aşağıdaki denklem (2.43) şeklinde yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K_L]\{U\} + \{P_N\} = \{P\} \quad (2.43)$$

Bu denklemde;

$[M]$; sistemin kütle matrisi

$[C]$; sistemin sönümü sabiti

$[K_L]$; doğrusal olmayan bağlantı elemanları hariç doğrusal elastik elemanların rijitlik matrisi

$\{U\}$; sistemin yerdeğiştirme vektörü

$\{\dot{U}\}$; sistemin ivme vektörü

$\{P\}$; dış yük vektörü

$\{P_N\}$; doğrusal olmayan bağlantı elemanlarındaki doğrusal olmayan serbestlik derecesinden doğan yük vektörüdür.

Doğrusal olmayan elemanların her serbestlik derecesi için bir doğrusal efektif rijitlik tanımlanmıştır. Bu rijitlik değeri keyfi bir değerdir; ama genellikle '0' ile maksimum doğrusal olmayan rijitlik arasında değişmektedir. Buna göre (2.43) denklemini tekrar yazılacak olursa;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} - (\{P_N\} - [K_N]\{U\}) \quad (2.44)$$

elde edilir. Burada $[K] = [K_L] + [K_N]$ şeklindedir.

$[K_L]$; doğrusal olmayan bağlantı elemanlarının doğrusal serbestlik dereceleri için bütün doğrusal elastik elemanların rijitlik matrisidir.

$[K_N]$; bütün doğrusal olmayan serbestlik dereceleri için doğrusal efektif rijitlik matrisidir.

2.3.4. SAP2000 Yapısal Analiz Programı ile Çerçeve Analizi

SAP2000 yapısal analiz programı, statik, dinamik ve deprem mühendisliği için her türden yapının sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu doğrusal ve doğrusal olmayan analizi

ve boyutlandırılmasını yapan bir yazılımdır. SAP2000 ile bir, iki ve üç boyutlu elemanlar ile mühendislik problemleri çözülebilmektedir.

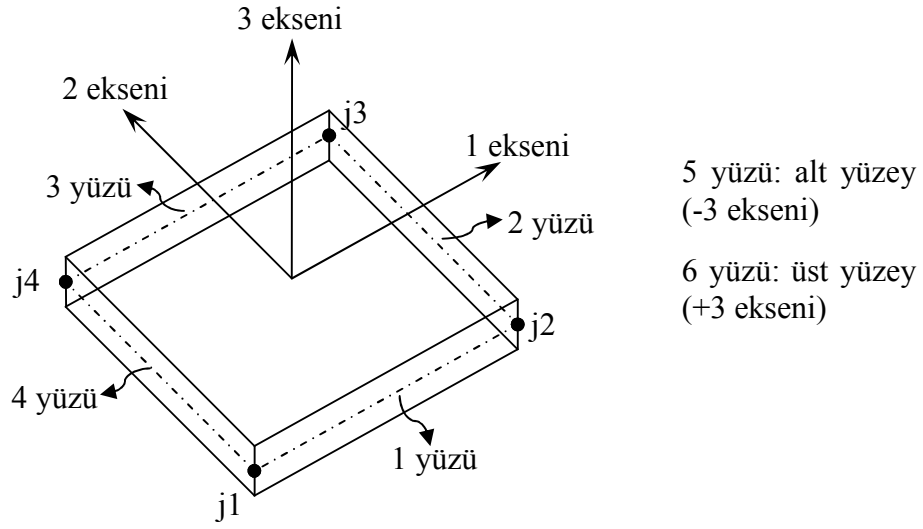
SAP2000’de düzlem çerçeve sistemlerin analizi genellikle bir boyutlu çubuk (frame) elemanlar ile yapılmaktadır. Bununla birlikte, iki ve üç boyutlu elemanlarla da çözüm yapılabilmektedir. Düzlem bir çerçevenin analizi çubuk elemanlar ile yapıldığında yalnızca çubuklara ait kesit tesirleri elde edilebilmektedir. Kolon-kiriş birleşim detayları bu kesit tesirlerine göre şekillendirilir. Aynı çerçeve sistem, iki boyutlu kabuk (shell) elemanlar ile modellendiğinde ve birleşim noktalarında doğrusal olmayan elemanlar kullanıldığında, kabuk elemanlardaki gerilmeler ve birleşim noktalarındaki bulon ve kaynak kuvvetlerine direk olarak ulaşılabilmektedir.

2.3.5. SAP2000’de Kabuk Eleman (Shell Element)

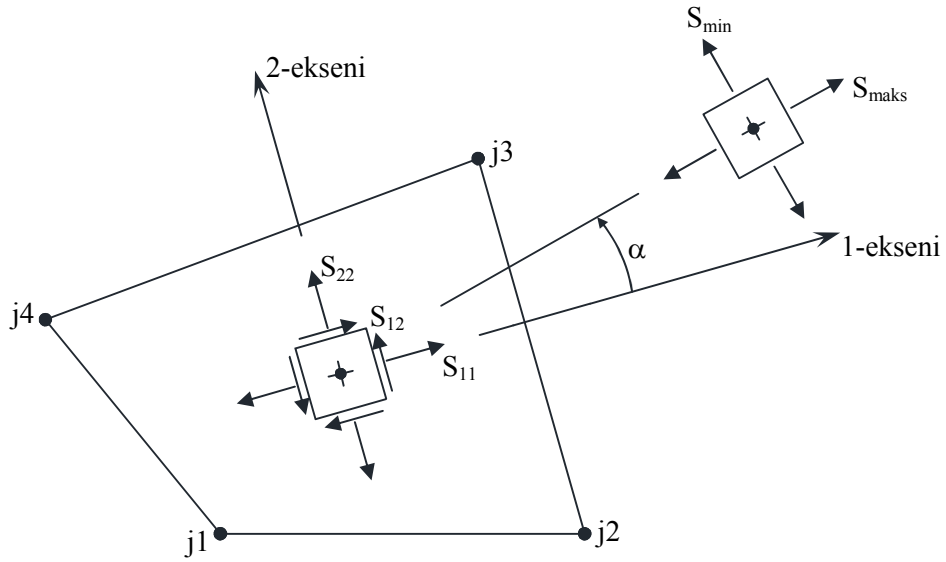
SAP2000’de kabuk eleman (Shell Element), iki ve üç boyutlu yapılarda kabuk, plak ve zar (membrane) eleman davranışını modellemek için kullanılmaktadır. Sıvı tankları ve kubbe gibi üç boyutlu kabuklar, döşeme gibi plak türü yapılar ve kayma duvarı gibi zar yapılar bu elemanlar yardımıyla modellenebilmektedir.

Kabuk elemanlar kullanılarak yapı modellerinin doğru oluşturulabilmesi için kabuk elemanlardaki yerel eksen takımlarının ve yüzey numaralarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Kabuk elemanda yerel eksenler 1, 2 ve 3 numaraları ile temsil edilmektedir. Kabuk elemanın 3 eksenini daima yüzeye diktir. j1, j2, j3 ve j4 düğüm noktalarının saat ibresinin tersi yönünde oluşturulması halinde bu eksen kullanıcıya doğrudur. 2 ve 3 eksenlerinin yönleri ise, 3 ekseninin ve genel eksen takımında Z ekseninin yönüne bağlıdır. 2 ve 3 ekseninin oluşturduğu düzlem Z eksenine daima paraleldir. Z ekseninin yatay olmadığı durumda ise 2 eksenini yukarı yönlüdür. 1 eksenini genel eksen takımında X-Y düzlemi içerisindedir (Şekil 2.5).

Kabuk elemanda gerilmeler, S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{13} ve S_{23} şeklindedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.5. Dört düğüm noktalı kabuk eleman



Şekil 2.6. Kabuk elemanda gerilmeler

2.3.6. SAP2000'de Doğrusal Olmayan Bağlantı Elemanı (Nlink Element)

Doğrusal olmayan bağlantı elemanı, boşluk (gap), sönümleyici ve izolator gibi yerel yapısal doğrusal olmama durumlarını modellemek için kullanılmaktadır. SAP2000'de bu elemanın doğrusal olmayan davranışı, yalnızca doğrusal olmayan zaman tanım analizlerinde dikkate alınmaktadır. Diğer bütün analizlerde doğrusal olmayan bağlantı elemanı doğrusal davranış sergilemektedir.

Doğrusal olmayan bağlantı elemanı, tek bir düğüm noktasına bağlı yay veya iki düğüm noktalı bir bağlantı elemanı olabilir. Her iki eleman için özellikler aynı şekilde tanımlanmaktadır.

Her elemanın 6 ayrı yaydan oluştuğu ve bu yayların 6 serbestlik dereceli olduğu kabul edilmektedir. Bu yayların her biri aşağıdaki iki özelliğe sahiptir;

- Bütün doğrusal analizler için doğrusal efektif rijitlik ve sönüm mevcuttur.
- Doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon bağıntısı sadece doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizlerde kullanılmaktadır.

Efektif rijitlik ve efektif sönüm özellikleri doğrusal analizler için tanımlanabilmektedir. Doğrusal analizler arasında; statik analiz, P delta analizi, modal analiz, hareketli yük analizi, tepki spektrumu analizi, harmonik kararlı hal analizi ve periyodik zaman tanım alanı analizi yer almaktadır. Doğrusal efektif sönüm özelliği sadece tepki spektrumu analizleri ve doğrusal zaman tanım alanı analizlerinde kullanılmaktadır. Efektif sönüm, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde hiçbir zaman kullanılmamaktadır.

Bu eleman ile modellenebilen doğrusal olmayan davranışlar aşağıda verilmiştir;

- Viskoelastik sönüm
- Boşluk (sadece basınç) ve kanca (sadece çekme)
- Tek eksenli plastisite
- İki eksenli plastik taban izolatörü
- Sürtünmeli sarkaç tipi taban izolatörü

Aşağıda doğrusal efektif rijitliğin seçiminde dikkat edilecek hususlar verilmiştir.

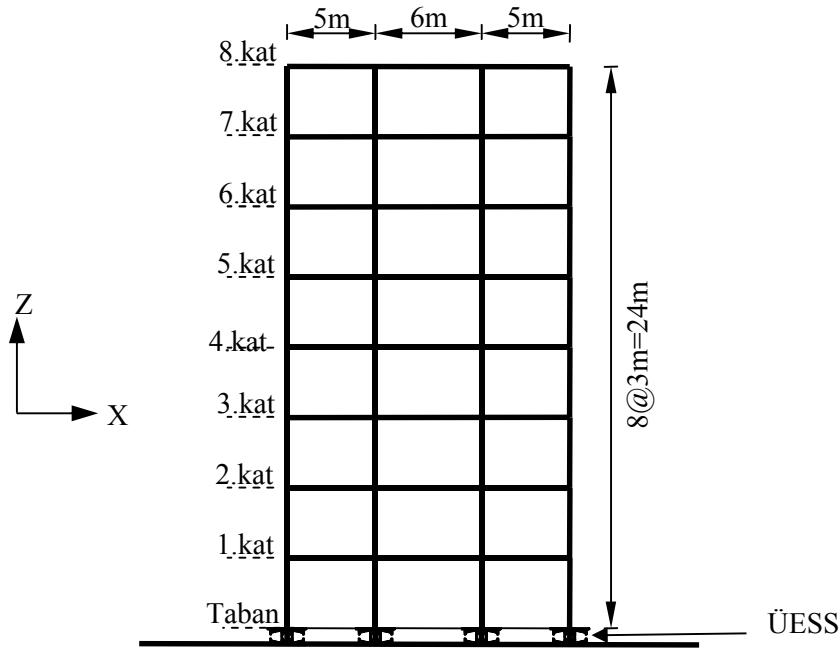
• UBC'94 yönetmeliğine göre analizler yapıldığı zaman, efektif rijitlik genellikle bu yönetmelikte tanımlı maksimum efektif alınmalıdır.

- Boşluk ve kanca elemanları için efektif rijitlik çoğunlukla "0" veya "**k**" olmalıdır.
- Sönümleyici elemanlar için efektif rijitlik çoğunlukla "0" olmalıdır.
- Diğer elemanlar için efektif rijitlik "0" ile "**k**" arasında olmalıdır.

• Eğer suni olarak **k** değeri çok büyük seçilirse, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde sayısal problemlerden kurtulmak suretiyle **k_e** için çok daha küçük değerler alınmalıdır.

2.4. Zemin-Yapı Etkileşimi İçermeyen Düzlem Çerçeve Modeli

Yapılan çalışmalar bölümünün ilk kısmında, dinamik analizleri yapılmak üzere 8 katlı düzlem çerçeve modeli seçilmiştir (Şekil 2.7). Bu düzlem çerçeve modelinde; yatay ve düşey yerdeğiştirme ile bu eksenlere dik doğrultu etrafında dönme olmak üzere 3 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. Düzlem çerçeve bütün bir şekilde hareket edebilmesi için izolasyonlu sistemde taban seviyesindeki kirişler rijit olarak modellenmiştir.



Şekil 2.7. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen (Rijit zemin) 8 katlı düzlem çerçeve modeli

Düzlem çerçeve modeli; izolasyonsuz ve ÜESS mesnetli olarak zaman tanım alanında analizi yapılmıştır. Analizlerde SAP2000 yapısal analiz programı kullanılmıştır. Düzlem çerçevenin, kesit ve malzeme özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

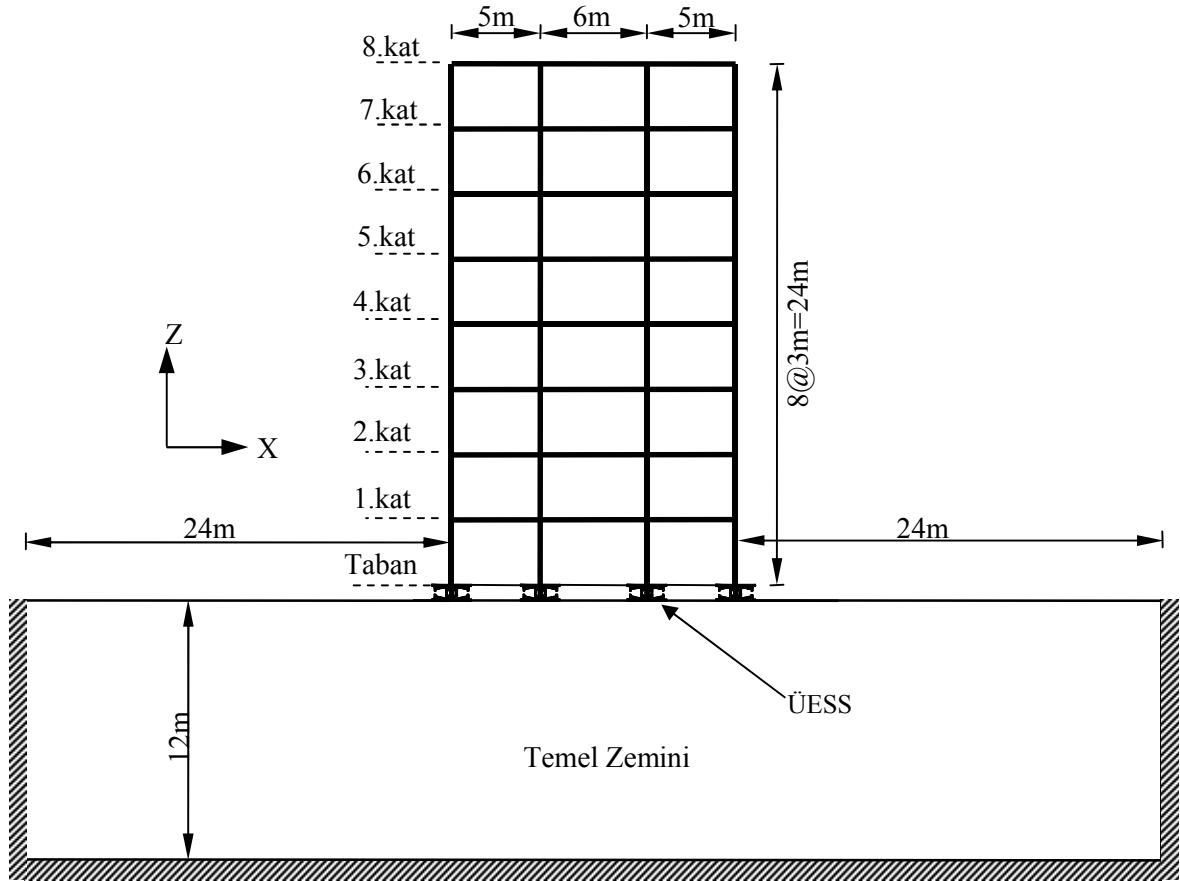
Tablo 2.1. Düzlem çerçevenin kesit ve malzeme özellikleri

	En kesiti (cm/cm)	Atalet Momenti (m ⁴)	Birim Hacim ağırlığı (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)
Kolonlar	30/80 (1.-2. katlar)	12,800x10 ⁻³	25	28,5 x10 ⁶
	30/70 (3.-5. katlar)	8,575x10 ⁻³		
	30/50 (6.-8. katlar)	3,125x10 ⁻³		
Kirişler	30/60	5,400x10 ⁻³	25	28,5 x10 ⁶

2.5. Zemin-Yapı Etkileşimi İçeren Düzlem Çerçeve Modeli

Yapılan çalışmalar bölümünün ikinci kısmında, dinamik analizleri yapılmak üzere zemin-yapı etkileşimi içeren 8 katlı düzlem çerçeve modeli seçilmiştir. Bu düzlem çerçeve modelinde; yatay ve düşey yerdeğiştirme ile bu eksenlere dik doğrultu etrafında dönme olmak üzere 3 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. Zemin de ise yatay ve düşey yerdeğiştirmeler olmak üzere 2 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. Bu kısımda da düzlem çerçeve bütün bir şekilde hareket edebilmesi için, izolasyonlu sistemde taban seviyesindeki kirişler rijit olarak modellenmiştir.

Düzlem çerçevenin üzerine oturduğu zeminin özellikleri Tablo 2.2’de verilmiş zemin doğrusal elastik olarak dikkate alınmıştır (Şekil 2.8). Temelin derinliği binanın yüksekliğinin yarısı kadar; genişliği ise binanın yüksekliği kadar kabul edilmiştir. Zemin içerisinde yer hareketlerinin neden olduğu yansılardan kaçınmak için zemin kütsüz olarak modellenmiştir. (Leger ve Boughoufalah, 1989; Bayraktar vd., 2005; Akköse vd., 2008).



Şekil 2.8. Zemin-yapı etkileşimi içeren 8 katlı düzlem çerçeve

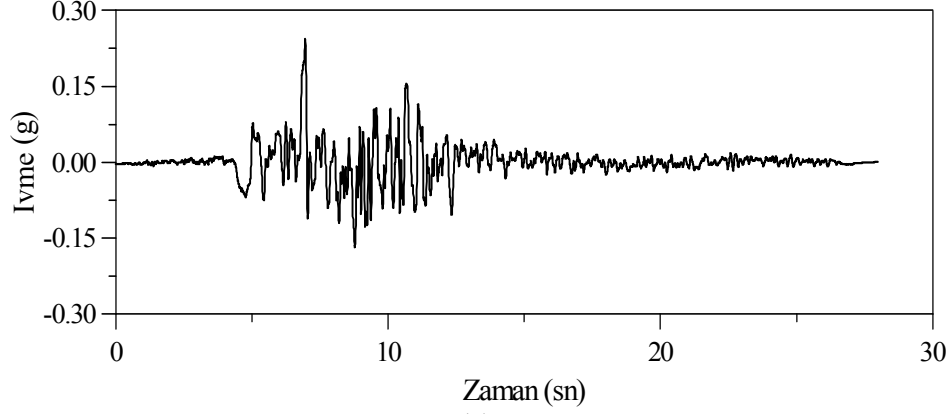
Tablo 2.2. Temel zeminin özellikleri

Zemin Tipi	Poisson oranı	Kesme Modülü (kN/m ²)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Sönüm Oranı (%)
Yumuşak	0,40	245 x10 ³	686 x10 ³	0,06
Orta	0,35	1225 x10 ³	3308 x10 ³	0,04
Sert	0,30	2250 x10 ³	5850 x10 ³	0,02

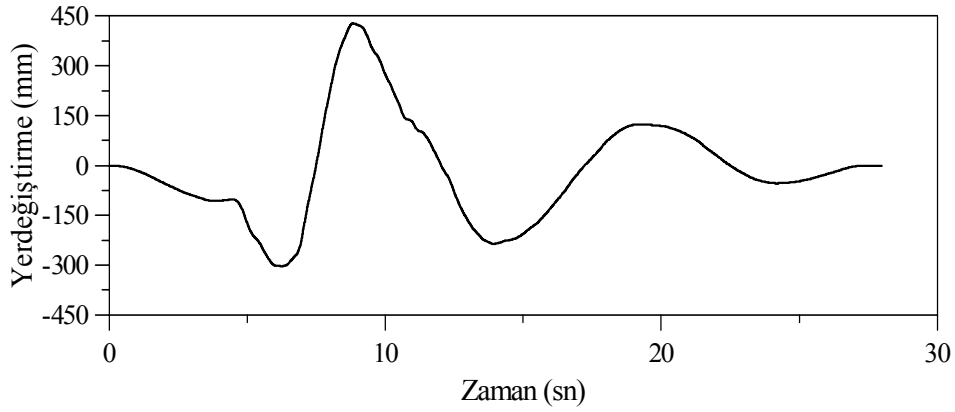
2.6. Yer Hareketi

Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen her iki durumda 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Gebze İstasyonu kaydının GBZ000 bileşeni kullanılmıştır (PEER, 2009). Düzlem çerçeveden ÜESS mesnet sistemine gelen düşey yükleri hesaba katmak için zaman artım analizi başlangıcında bir rampa fonksiyonu kullanılarak düşey yüklerin izolatörlere etkimesi sağlanmıştır. ÜESS mesnet sisteminin tüm kayma hareketlerini yapmasını

sağlamak için deprem kayıtları 2 ile çarpılarak analizler yapılmıştır. Zaman adımı olarak 0,005 s kullanılmıştır. Dinamik analizlerde zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Deprem kaydı Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.9. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ivme–zaman (a) ve yerdeğiştirme–zaman (b) grafikleri

2.7. Düzlem Çerçevenin Sismik İzolasyonunda Kullanılan ÜESS Mesnedinin Mevcut Parametreleri

Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen her iki durumdaki ÜESS mesnet sisteminin mevcut parametreleri aşağıdaki Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. ÜESS mesnedinin parametreleri

Değişkenin adı	Değerler
$R_{eff1}=R_{eff4}$ (mm)	1200
$R_{eff2}=R_{eff3}$ (mm)	230
$d_1=d_4$ (mm)	200
$d_2=d_3$ (mm)	80
$\mu_1=\mu_4$	0,04
$\mu_2=\mu_3$	0,01

2.8. Seri Modelde Kullanılan Parametreler

Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen her iki durumda, düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnedinin SAP2000 programında seri model şeklinde modellenmesi için gerekli olan parametreler Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Düzlem çerçevedeki seri modelde kullanılan parametreler

	TESS1	TESS 2	TESS 3
Eleman yüksekliği (mm)	100	50	100
Kesme deformasyon yeri (mm)	50	25	25
Taşınan kütle (kN)	1700	1700	1700
Düşey rijitlik (kN/m)	4174882	4174882	4174882
Elastik rijitlik (kN/m)	8500	34000	34000
Efektif rijitlik (kN/m)	3696	1753	1753
Sürtünme katsayısı-hızlı	0,010	0,040	0,040
Sürtünme katsayısı-yavaş	0,005	0,020	0,020
Çap (mm)	460	970	970
Oran parametresi(s/mm)	0,050	0,124	0,124

Seri modelde kullanılan parametreler, Tablo 2.3 ve denklem (2.2) - (2.15)'den elde edilir. Tablo 2.4'deki TESS1 içteki 2 ve 3 nolu yüzeyleri; TESS2 dıştaki 1 nolu yüzeyi; TESS3 ise dıştaki 4 nolu yüzeyi temsil eder. Seri modelde düzenlenen elemanların yüksekliklerinin toplamı mevcut olan elemanın yüksekliğinin toplamına eşittir. Kesme

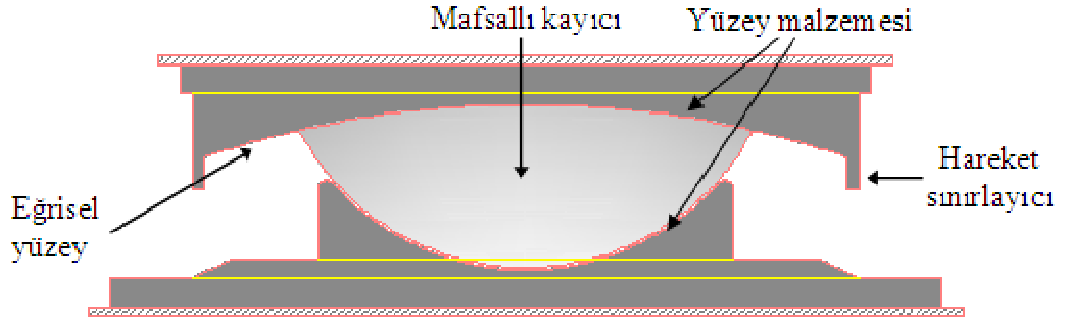
deformasyonu, elemanın yüksekliğinin yarısında oluşur. Elemanın kütlesi analiz sonuçlarını etkilemez; ancak analizin etkinliği için gereklidir. Seri modelin SAP2000’de modellenmesi Şekil 2.2’deki gösterim gibidir.

2.9. Gülburnu Köprüsü

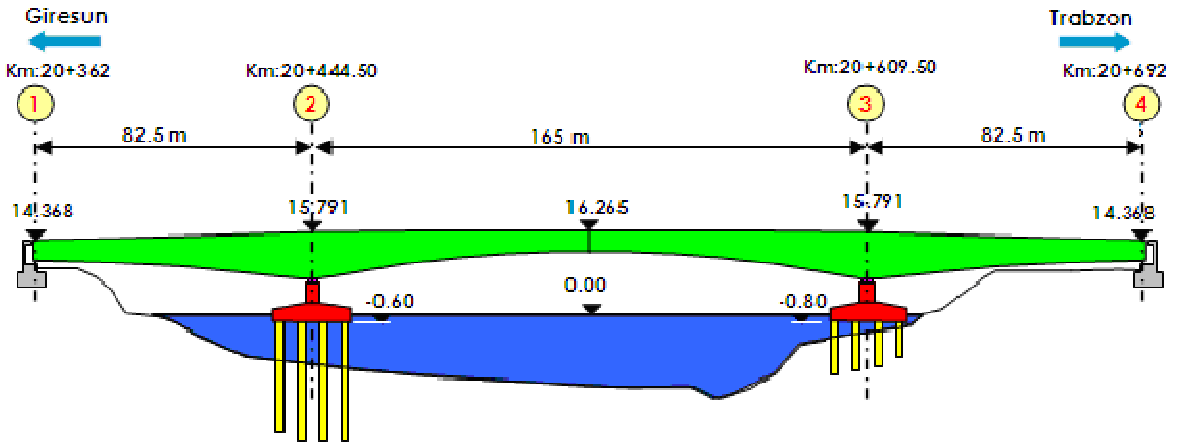
Gülburnu Köprüsü ‘Karadeniz Sahil Yolu İyileştirme Projesi’ kapsamında Trabzon-Giresun Devlet Yolu’nun 20+362 ve 20+692 km’leri arasında yapılmıştır. Tarihi Zefre Limanı’nın bulunduğu ve doğal güzelliğe sahip Gülburnu Koyu’nun doğal güzelliğinin bozulmaması amaçlanarak bu köprü yapılmıştır. 1998-2000 yılları arasında çeşitli taşıyıcı sistemlere sahip köprüler yapılması düşünülmüş; ancak son olarak dengeli konsol yöntemi uygulanarak inşa edilen öngermeli, yerinde dökme kutu kesitli bir köprü yapılmasına karar verilmiştir. 2009 yılında inşası tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Gülburnu Köprüsü, Ülkemizdeki dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen iki betonarme köprüden birisidir. Diğeri ise Malatya’daki Kömürhan Köprüsü’dür. Köprü ayakları ve tabliyesi arasında izolatörler bulunmaktadır. Şekil 2.10’da Gülburnu Köprüsü’ne ait bazı fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 2.10 Gülburnu Köprüsü



Şekil 2.11 Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan TESS mesnet sistemi (Yüksel Proje, 2007).



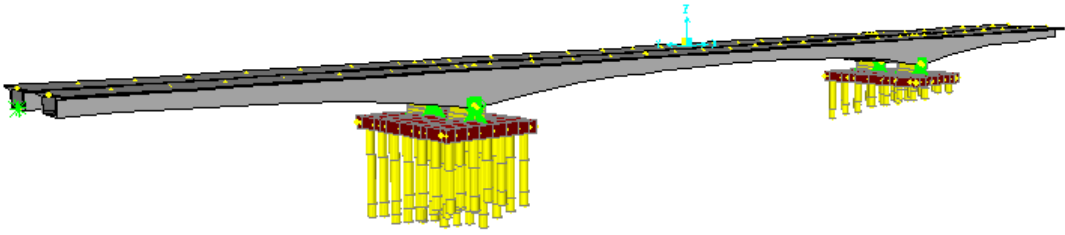
Şekil 2.12. Gülburnu Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları (Yüksel Proje, 2007).

Gülburnu Köprüsü'nün deprem izolasyonunda TESS mesnet sistemi kullanılmıştır. Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan TESS mesnet sisteminin kesit görünüşü Şekil 2.11'de verilmektedir.

Gülburnu köprüsü 3 açıklıklı olup, kenar açıklıkları 82,5 m orta açıklığı 165 m ve toplamda uzunluğu 330 m'dir. Üst yapı yüksekliği orta ayak üzerinde 8,25 m, köprü ortasında ve uçlarında 3,5 m'dir. Köprü'nün gabarisi, orta ayaklarda 7,5 m'den başlayarak orta açıklıkta 12,5 m'ye kadar artmaktadır. Köprü'nün inşası sırasında 3800 ton inşaat demiri, 738 ton öngerme kablosu ve 25000 m³ beton kullanılmıştır. Köprü boy kesiti ve eleman boyutlarına ait genel görünüşler Şekil 2.12'de verilmektedir. Köprü taşıyıcı sistemi başlıca tabliye, ayaklar, kenar mesnetler ve izolatörlerden oluşmaktadır.

Gülburnu Köprüsü'nün dinamik özelliklerini analitik olarak belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli (SEM) SAP2000 programında oluşturulmuştur. Köprü davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu eleman modeli

zemin-yapı temel etkileşimini dikkate alacak şekilde geliştirilmiştir. Tabliye, ayaklar ve temel kazıklar altı serbestlik derecesine sahiptir. Çubuk elemanlar ve radye temeller kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kenar ayaklarda mesnet şartı olarak sadece tabliye uzunluğu boyunca oluşabilecek yerdeğiştirmelere müsaade edilmiştir. Temel kazıklarının uç noktalarındaki sınır şartı yüksek rijitliğe sahip yay elemanlar kullanılarak belirlenmiştir. Ayaklar ve tabliye arasında yerleştirilen sürtünmeli sarkaç izolatörler bağlantı (link) elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.13'de verilmektedir.



Şekil 2.13. Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Altunışık vd. (2010), sonlu elemanlar modeli ve çevresel titreşim testleri kullanarak Trabzon-Giresun karayolunda bulunan Gülburnu Köprüsü analitik ve deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada köprüyü SAP2000 programını kullanarak dinamik karakteristiklerini analitik olarak elde etmişlerdir. Çevresel titreşim etkilerini köprü üzerine gelen trafik yüklerinden sağlamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, çevresel titreşim ölçümleri düşük doğal frekans aralığı ile yapısal modları belirlemede yeterlidir. Bununla birlikte köprü'nün sonlu elemanlar modelinden elde edilen dinamik karakteristikler deneysel frekanslar ve mod biçimleri ile birlikte iyi bir uyuma sahiptir.

2.9.1. Malzeme Özellikleri

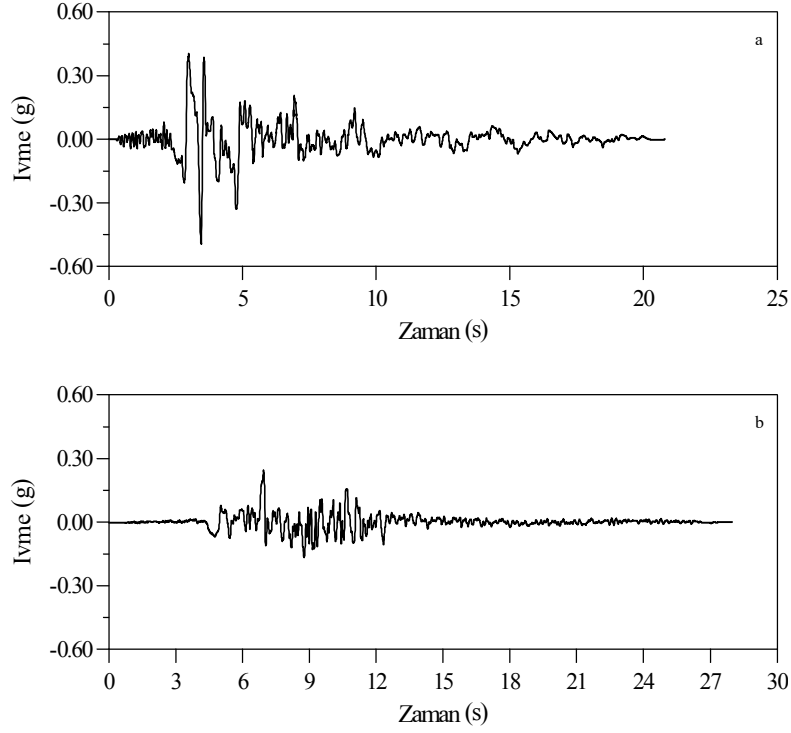
Gülburnu Köprüsü'nün analizinde kullanılan malzeme özellikleri aşağıdaki Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5. Gülburnu Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

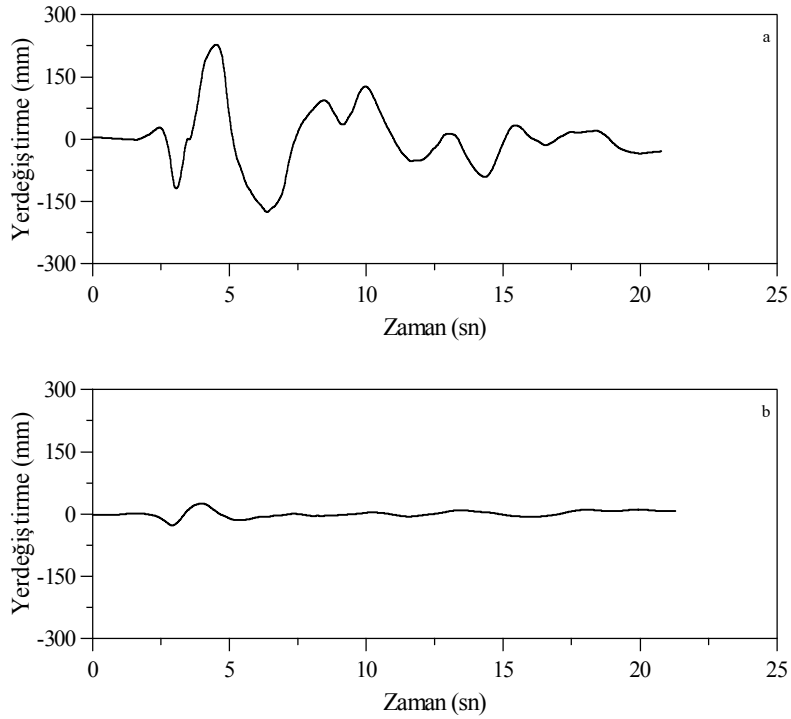
Eleman	Malzeme sınıfı	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Poisson oranı	Yoğunluk (kN/m ³)
Tabliye	C40	3,6x10 ⁷	0,2	25
Ayaklar	C35	3,5 x10 ⁷	0,2	25
Kazıklar	C30	3,4 x10 ⁷	0,2	25
Temel	C30	3,4 x10 ⁷	0,2	25
Çelik Donatı*	S420	2,1 x10 ⁷	0,3	7850
*Akma Dayanımı=1600 MPa		Nihai Dayanım=1860 MPa		

2.9.2 Yer Hareketi

Gülburnu Köprüsü'nün davranışını belirlemek için dinamik analizlerde yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının ERZ-EW ve ERZ-NS yatay bileşenleri kullanılmıştır (PEER, 2009). ERZ-NS bileşeni tabliye boyunca, ERZ-EW bileşeni ise tabliyeye dik yönde uygulanmıştır. Bu yer hareketi, köprüye yakın bir bölgede meydana geldiği için tercih edilmiştir. ÜESS mesnet sistemine gelen düşey yükleri hesaba katmak için zaman artım analizi başlangıcında bir rampa fonksiyonu kullanılarak düşey yüklerin izolatörlere etkimesi sağlanmıştır. Erzincan depremi'nin bu kaydında zaman adımı olarak 0,005 s kullanılmıştır. Zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem kaydı Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. 13 Mart 1992 Erzincan depreminin ERZ-EW (a) ve ERZ-NS (b) bileşenlerine ait ivme zaman grafikleri



Şekil 2.15. 13 Mart 1992 Erzincan depreminin ERZ-EW (a) ve ERZ-NS (b) bileşenlerine ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri

2.9.3. Gülburnu Köprüsü'nde Kullanılan ÜESS Mesnedinin Mevcut Parametreleri

Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan ÜESS mesnet sisteminin mevcut parametreleri aşağıdaki Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan ÜESS mesnet parametreleri

Değişkenin adı	Değerler
$R_{eff1}=R_{eff4}$ (mm)	2108,2
$R_{eff2}=R_{eff3}$ (mm)	203,2
$d_1=d_4$ (mm)	345
$d_2=d_3$ (mm)	170
$\mu_1=\mu_4$	0,05
$\mu_2=\mu_3$	0,025

2.9.4. Seri Modelde Kullanılan Parametreler

Gülburnu Köprüsü'nün sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnetinin SAP2000 programında seri model şeklinde modellenmesi için gerekli olan aşağıdaki Tablo 2.7'de verilmiştir. Bu seri modele giriş parametreleri, Tablo 2.6 ve (2.2) - (2.15) denklemlerinden elde edilir.

Tablo 2.7. Gülburnu Köprüsü'ndeki seri modelde kullanılan parametreler

	TESS1	TESS2	TESS3
Eleman yüksekliği (mm)	300	270	270
Kesme deformasyon yeri (mm)	150	135	135
Taşınan kütle (kN)	38000	38000	38000
Düşey rijitlik (kN/m)	274900	274900	274900
Elastik rijitlik (kN/mm)	475	950	950
Efektif rijitlik (kN/m)	93504	19948	19948
Sürtünme katsayısı-hızlı	0,025	0,050	0,050

Tablo 2.7.'nin devamı

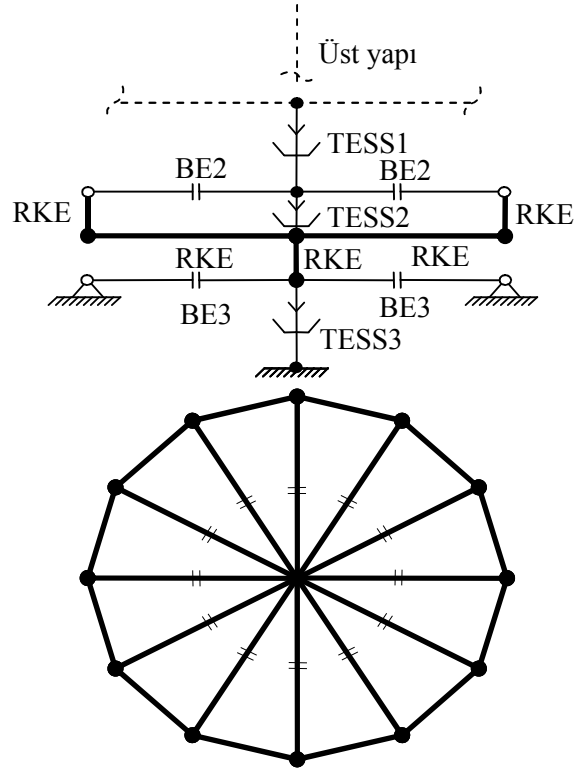
Sürtünme katsayısı-yavaş	0,0125	0,025	0,025
Çap (mm)	406,4	1.905	1.905
Oran parametresi(sn/mm)	0,025	0,550	0,550
Boşluk elemanı (mm)	-----	312	312

Seri modelde kullanılan parametreler, Tablo 2.6 ve denklem (2.2) - (2.15)'den elde edilir. Tablo 2.7'deki TESS1 içteki 2 ve 3 yüzeyini; TESS2 dıştaki 1 yüzeyini; TESS3 ise dıştaki 4 yüzeyini temsil eder. Seri modelde düzenlenen elemanların yüksekliklerinin toplamı mevcut olan elemanın yüksekliğinin toplamına eşittir. Kesme deformasyonu, elemanın yüksekliğinin yarısında oluşur. Elemanın kütlesi analiz sonuçlarını etkilemez; ancak analizin etkinliği için gereklidir. Seri modelin SAP2000'de modellenmesi Şekil 2.12'deki gösterim gibidir.

2.9.5. Gülburnu Köprüsü'nde Kullanılan ÜESS Mesnedinin SAP2000'de Modellenmesi

Şekil 2.2'de gösterilen düzenek sadece bir yöndeki uyarımlar için geçerlidir. Yapılan çalışmanın bu kısmı birbirine dik yönde uyarımlar içerir. Bu yüzden iki yönlü uyarımlar için yapılan bu model geçerli değildir.

İki yönde boşluk elemanları içeren analiz başarısızlıkla sonuçlanır. Çünkü boşluk elemanlarının SAP2000'deki özellikleri her bir serbestlik derecesinden bağımsızdır. Fiziksel olarak bu bir mesnedi temsil eder. Yani planda kare şeklinde görülür. Fakat açık olarak görülür ki mesnet planda daire biçimindedir. Bunun anlamı, sonuç olarak ortaya çıkan göreceli yerdeğiştirme, yerdeğiştirme kapasitesi \bar{d}_i 'ye eşit olduğu zaman boşluk elemanları birbirine tutturulmalıdır. Ancak SAP2000 programında birleşmiş boşluk elemanları mevcut değildir. Düz çizgi segmentini kullanarak yaklaşık bir daire düzeneği kullanabilmek suretiyle çok sayıda boşluk elemanı kullanılarak bunun üstesinden gelinir. Bu düzenek biraz karmaşık olmasına rağmen SAP2000'deki 'replicate radial' komutu ile kolayca oluşturulabilir (Fenz ve Constantinou, 2008; Fenz, 2008b). Oluşturulan üç boyutlu seri model Şekil 2.15'de gösterilmektedir.



Şekil 2.16 ÜESS mesnedinin üç boyutlu seri modeli

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Giriş

Uygulama amacıyla seçilen düzlem izolasyonlu ve izolasyonsuz çerçeve üzerinde yapılan çalışmada, elde edilen dinamik tepkiler karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte sismik izolasyonlu ve zemin-yapı etkileşimi içeren düzlem çerçeve ve sismik izolasyonsuz ve zemin-yapı etkileşimini içeren durumları için yapılan analizlerden elde edilen dinamik tepkiler de karşılaştırılmıştır. Düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnet modeli Bölüm 2.2’de belirtildiği gibi 2 boyutlu olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerde, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Gebze İstasyonu GBZ000 bileşeni kullanılmıştır (PEER, 2009).

Bir diğer uygulama ise Giresun Espiye Karadeniz sahil yolu iyileştirme çalışması kapsamında yapılan Gülburnu Köprüsü üzerinde yapılmıştır. Bu uygulamada ÜESS mesneti Bölüm 2.9.5’de açıklandığı gibi 3 boyutlu olarak modellenmiştir. 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının ERZ-EW ve ERZ-NS yatay bileşenleri yer hareketleri olarak kullanılmıştır.

Deprem izolasyon sistemleri doğrusal olmayan bir davranış sergilerler. Kuvvet yerdeğiştirme özellikleri aksenal kuvvete, heriki yönden gelen kuvvetlere ve yükleme oranlarına bağlıdır (Tsopelas vd., 1994). Bu durumlar göz önüne alınarak yukarıda bahsedilen sismik izolasyon sisteminin kullanıldığı yapıların analizleri için geliştirilen bilgisayar programları zaman tanım alanındaki analiz yöntemlerini içermektedir. Bu analiz, yukarıda adı geçen kuvvet–yerdeğiştirme ve izolatör özelliklerini hesaba katmalıdır (Tsopelas vd., 1994). Değişken histeretik ve viskoz sönüm aletleri ile birlikte izolasyon sistemleri ve kauçuk izolasyon sistemleri içerebilen deprem izolasyon sistemlerinin modellemesi için tasarlanmış bilgisayar programlarından biri 3D-BASIS’dir (Satish vd., 1994; Nagarajaiah vd., 1991). Bu çalışmada yapılan uygulamalarda sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz yapılarının analizinde etkili olan diğer bir program SAP2000 (Computers and Structures Inc., 2007) kullanılmıştır.

3.2. Zemin-Yapı Etkileşimi İçermeyen 8 Katlı Düzlem Çerçeve Modelinden Elde Edilen Bulgular

Zemin-yapım etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz mesnedli düzlem çerçevenin dinamik analizleri yapılmıştır. Analizlerde düzlem çerçevenin kendi ağırlığı ve döşemelerden gelen hareketli yükler düğüm noktalarına aktarılmıştır. Analizler sonucunda; periyotlar, düzlem çerçevenin her kat seviyesinde meydana gelen yerdeğıştirmeler, ivmeler ile her kata ait kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri, normal kuvvetleri ve eğilme momentleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır. En alt kolonlar altına yerleştirilen bir izolatördeki yerdeğıştirme ve izolatörde meydana gelen kesme kuvveti-yerdeğıştirme grafikleri elde edilmiştir.

Kat ve taban yerdeğıştirmeleri 3 serbestlik derecesine göredir. Bu düzlem çerçeve modelinde; yatay ve düşey yerdeğıştirme ile bu eksenlere dik doğrultu etrafında dönme olmak üzere toplam 3 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. Deprem etkisi düzlem çerçeveye yatay yönde etkidiği için elde edilen yerdeğıştirmeler ve ivmeler bu doğrultuda hesaplanmıştır.

3.2.1. Periyotlar

Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları Tablo 3.1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları

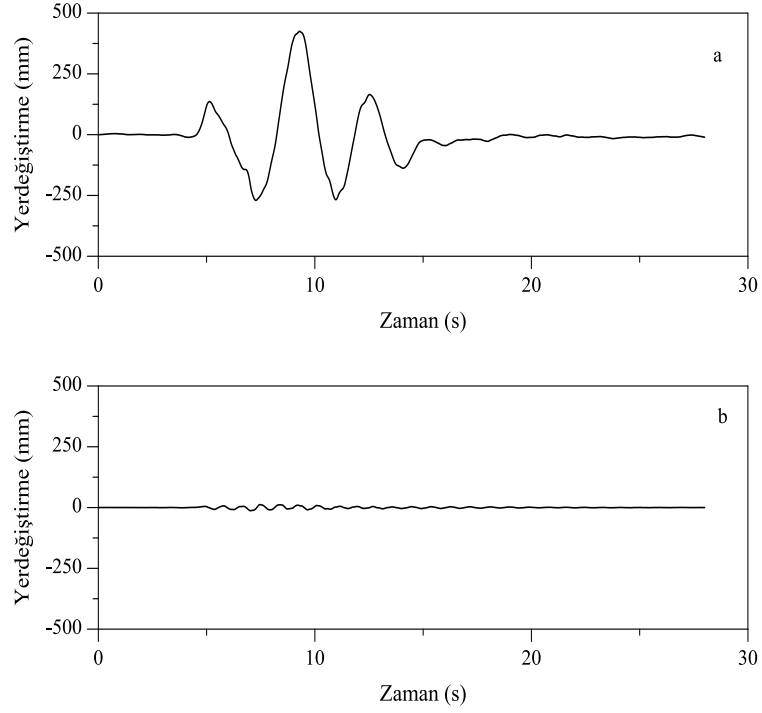
Mod No	Periyot (s)	
	İzolasyonlu	İzolasyonsuz
1	3,219	0,885
2	0,482	0,306
3	0,228	0,169
4	0,159	0,119
5	0,158	0,106

3.2.1.1 Periyotların İrdelenmesi

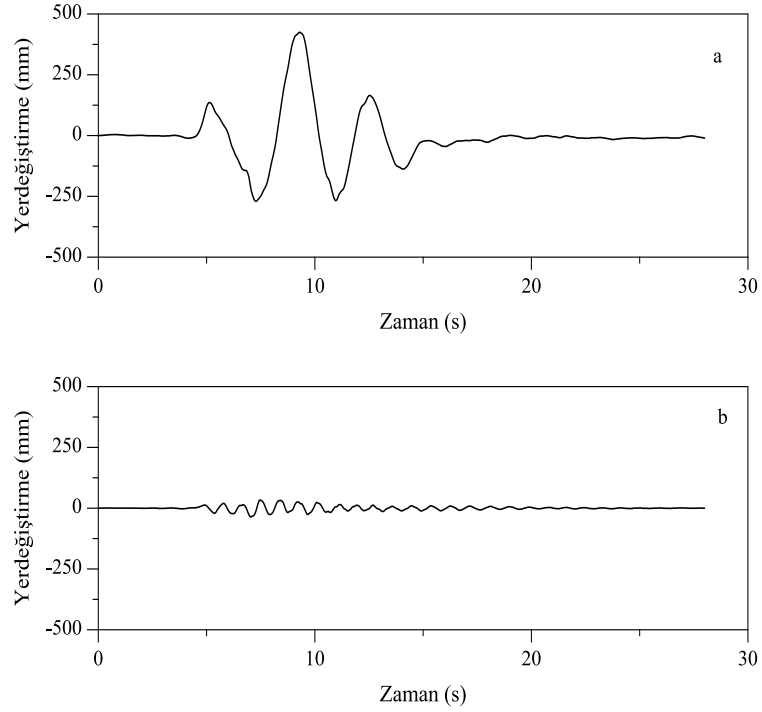
Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak modellenen düzlem çerçevenin analiz sonuçlarından elde edilen ilk 5 periyot Tablo 3.1’de verilmiştir. Her iki durumdaki hakim periyotlara bakıldığında sismik izolasyonlu yapılan düzlem çerçevenin hakim periyodunun izolasyonsuz duruma oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Periyodun artmasıyla düzlem çerçeveye gelen ivmelerde azalma gerçekleşerek depreme dayanıklılığı artacaktır. İvmelerin azalmasıyla kesit tesirlerinde azalma olacaktır. Böylece yapıdaki taşıyıcı eleman boyutlarında azalmaya gidilecektir Başka bir sonuç ise yapı daha fazla yerdeğiştirme yaparak izolatörde oluşan sürtünme kuvveti sayesinde enerji tüketimi artacaktır.

3.2.2. Kat Yerdeğiştirmeleri, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnetinin Yerdeğiştirmesi

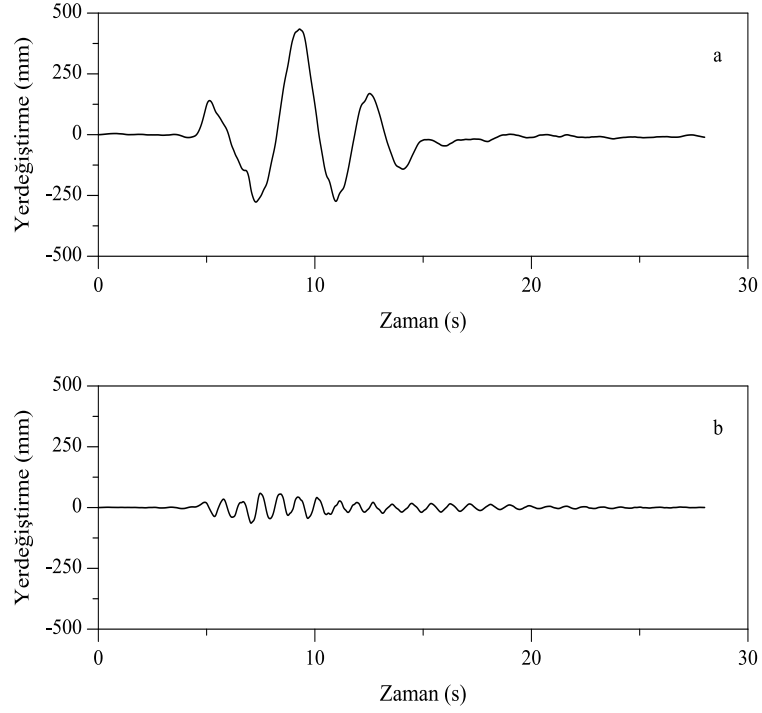
Katlara ait yerdeğiştirme ve ivmelerin zamanla değişimi Şekil 3.1-3.16’da ve ÜESS mesnet sisteminin yerdeğiştirme-zaman grafiği Şekil 3.17’de verilmiştir.



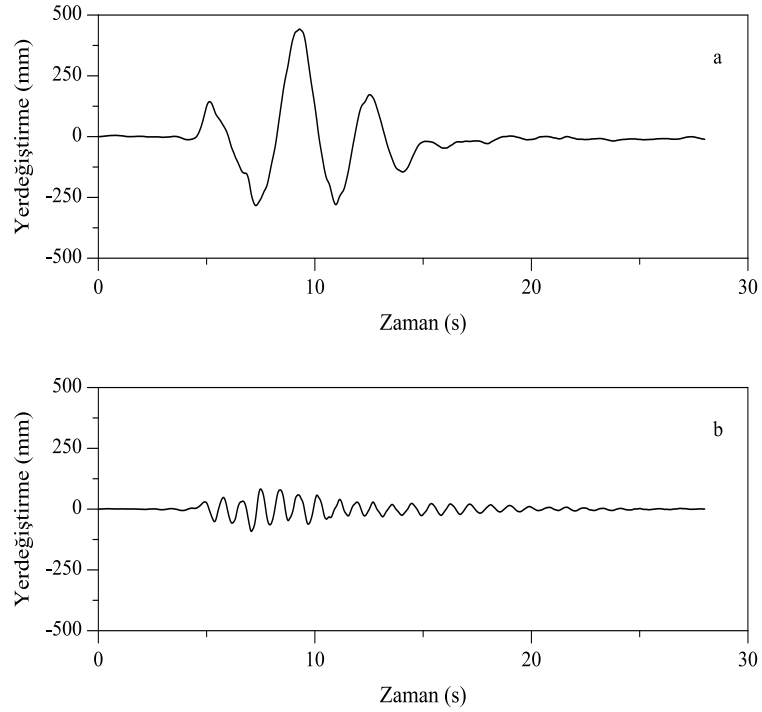
Şekil 3.1. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 1. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



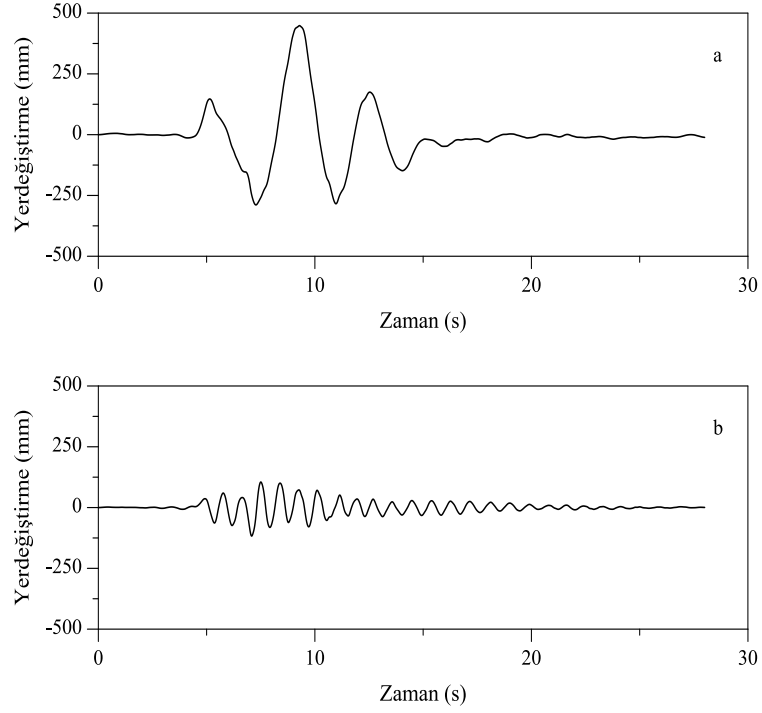
Şekil 3.2. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 2. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



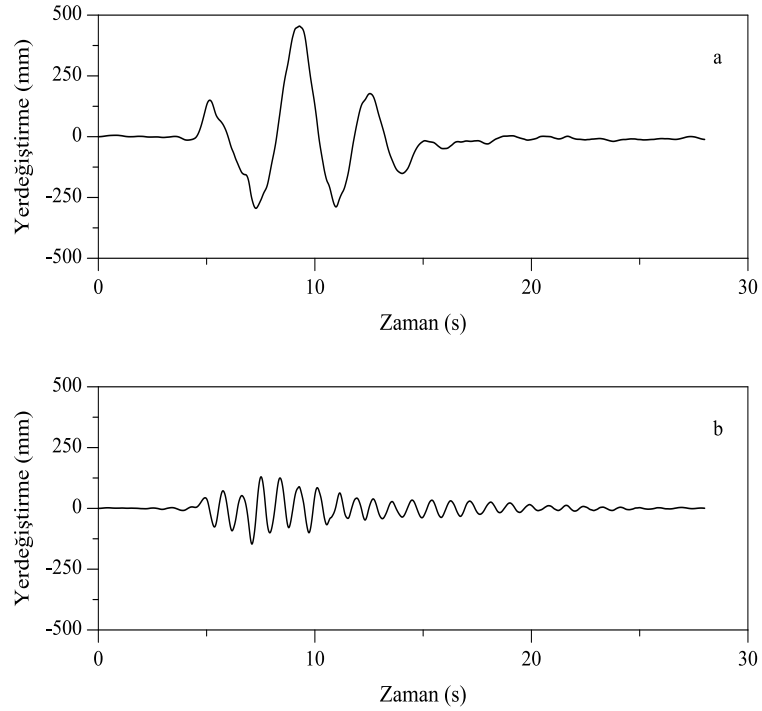
Şekil 3.3. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 3. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



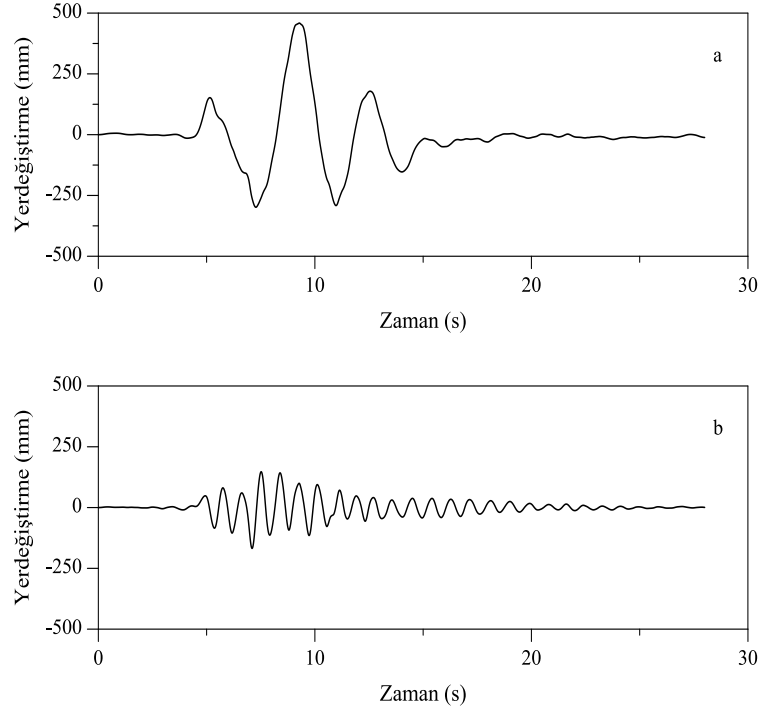
Şekil 3.4. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 4. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



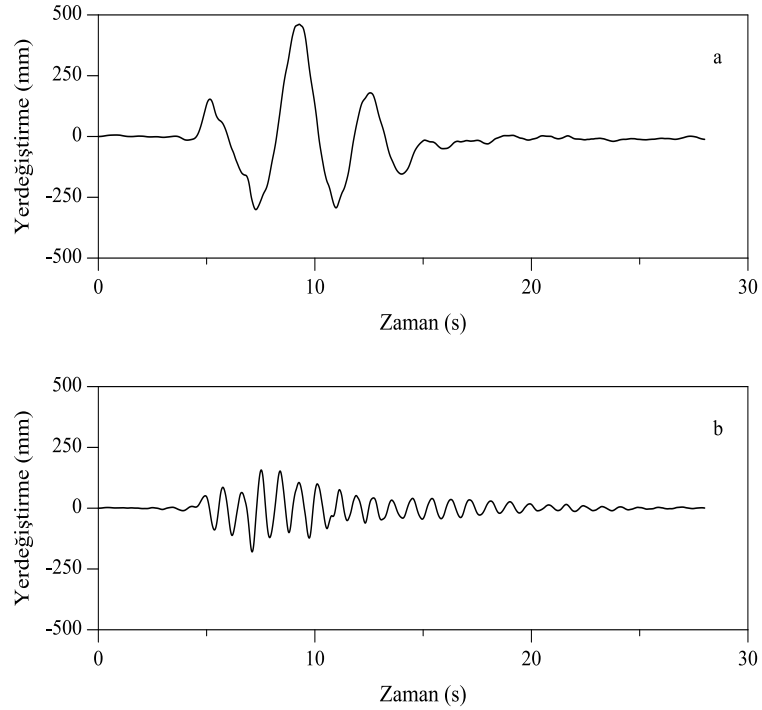
Şekil 3.5. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 5. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



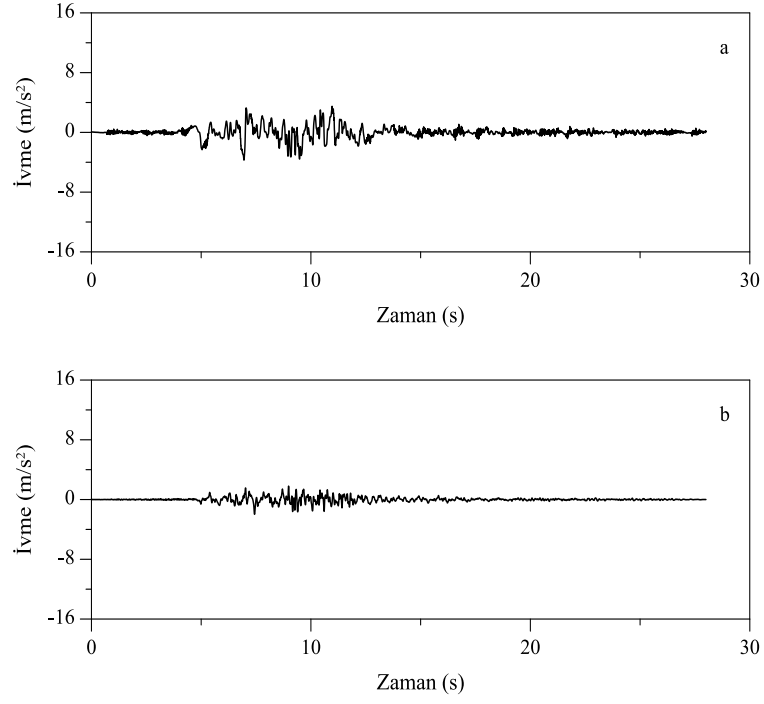
Şekil 3.6. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 6. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



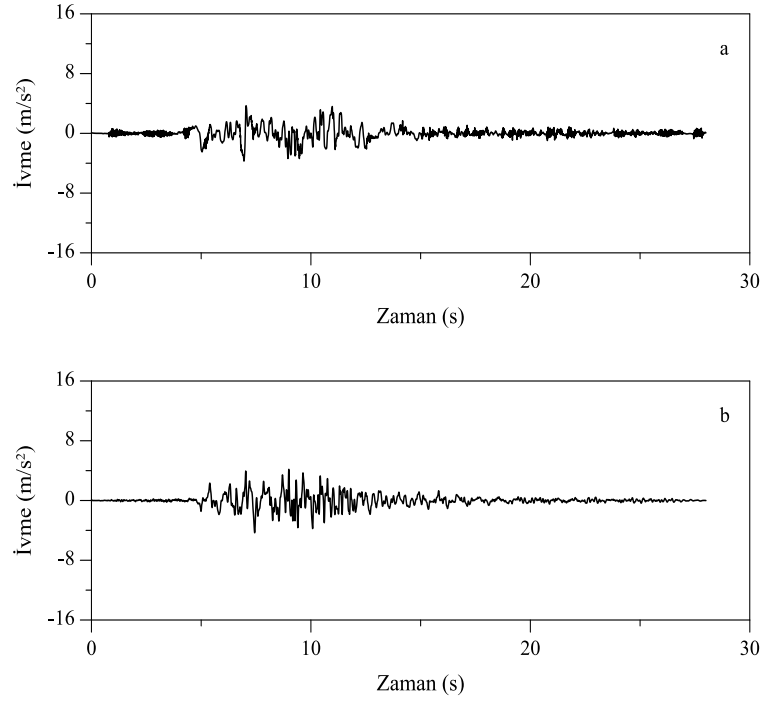
Şekil 3.7. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 7. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



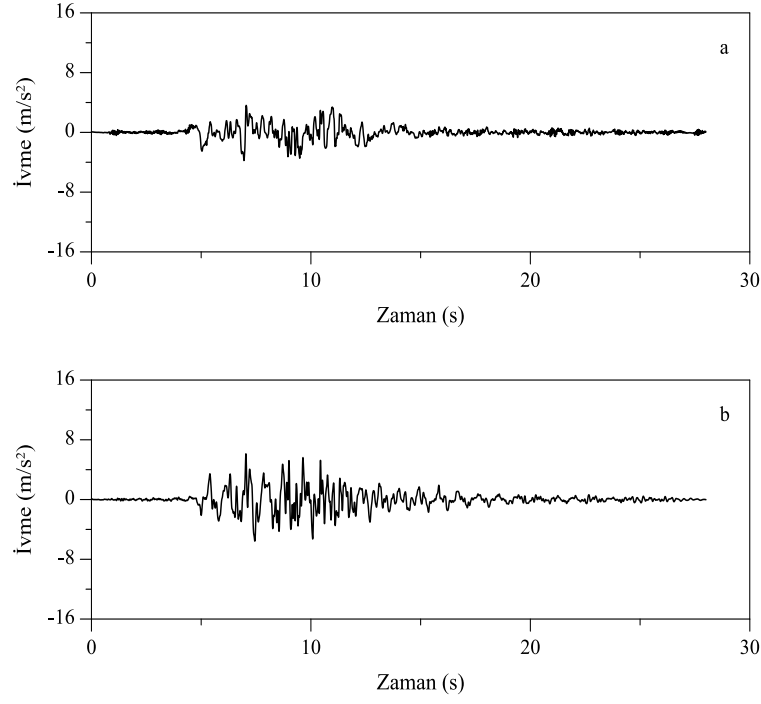
Şekil 3.8. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 8. kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



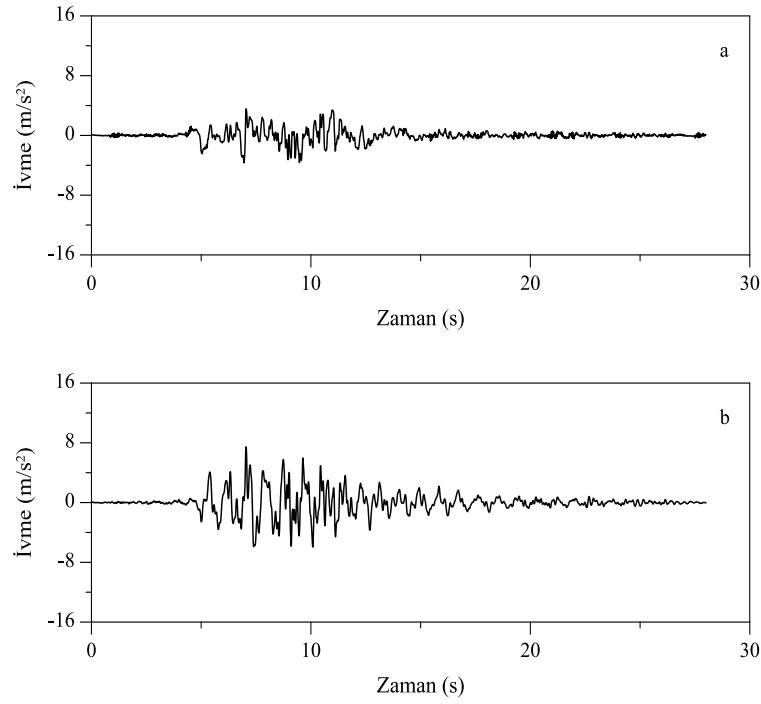
Şekil 3.9. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 1. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



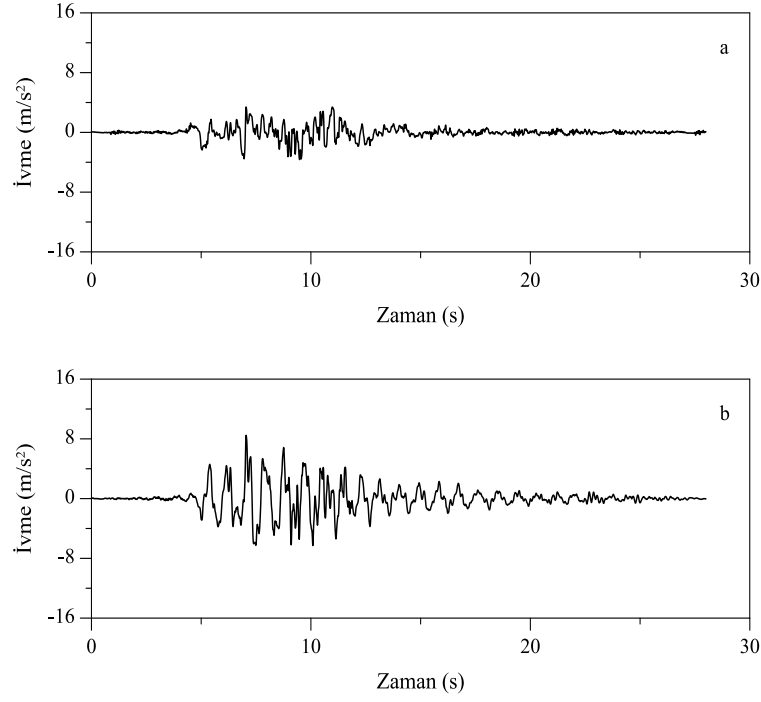
Şekil 3.10. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 2. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



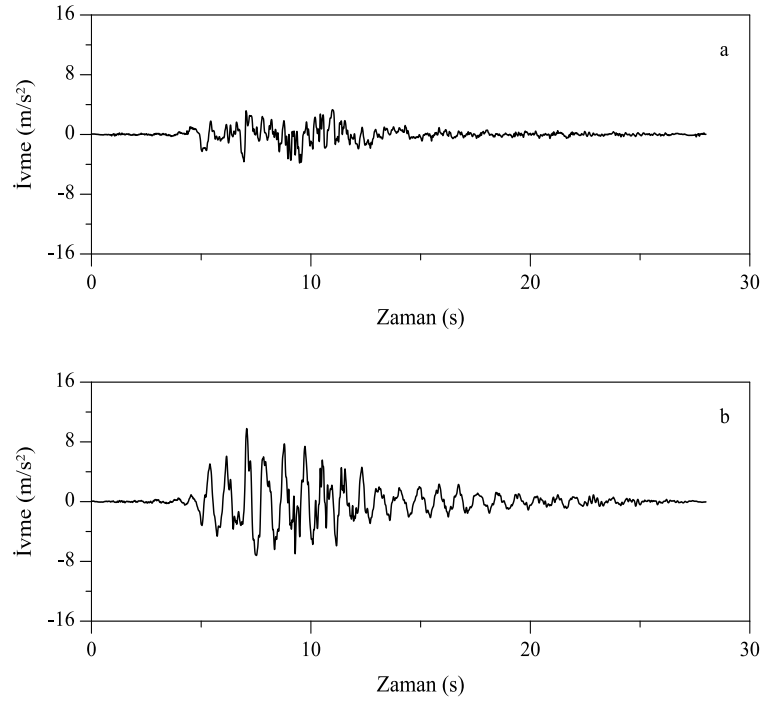
Şekil 3.11. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 3. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



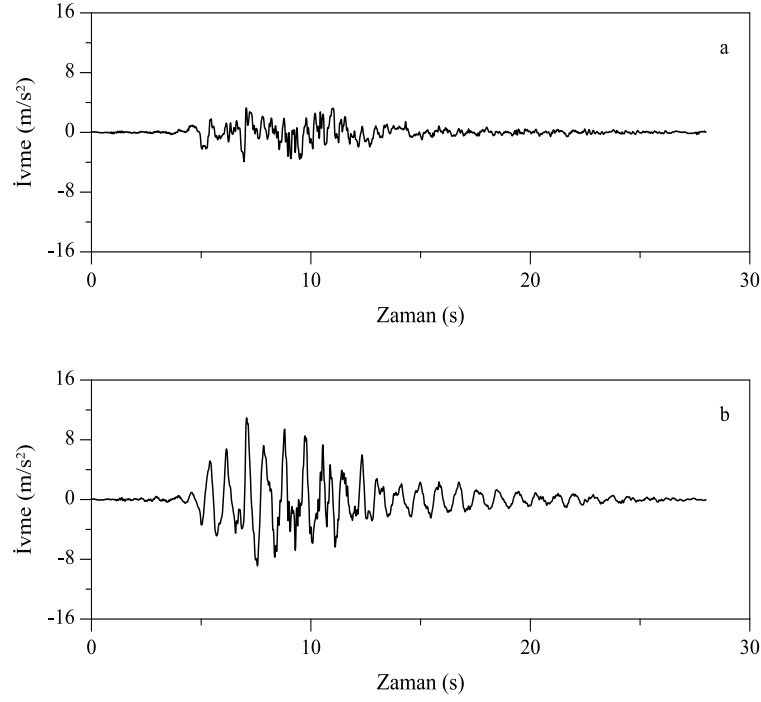
Şekil 3.12. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 4. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



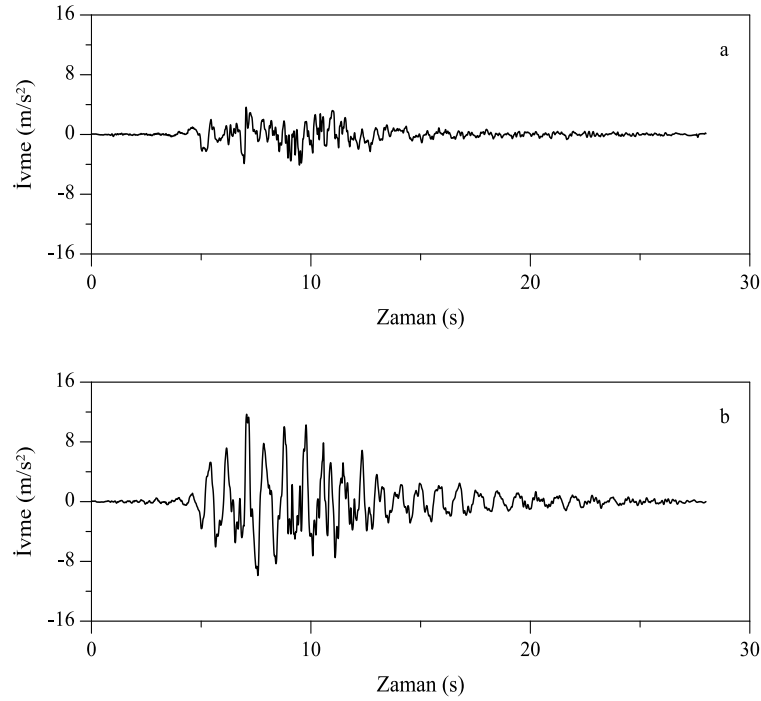
Şekil 3.13. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 5. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



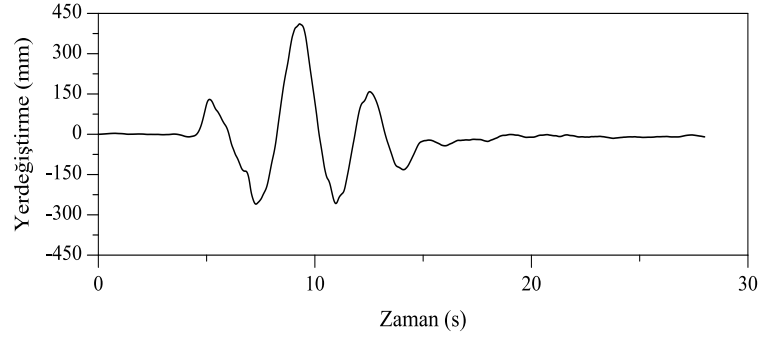
Şekil 3.14. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 6. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



Şekil 3.15. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 7. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



Şekil 3.16. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu (a) ve izolasyonsuz (b) düzlem çerçevenin 8. kat seviyelerindeki ivmelerinin karşılaştırılması



Şekil 3.17. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin yerdeğiştirmesi

3.2.2.1. Maksimum Kat İvmeleri, Maksimum Yerdeğiştirmeler ve ÜESS Mesnedinin Yerdeğiştirmesinin İrdelenmesi

ÜESS mesnet sistemi kullanılarak sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak modellenen 8 katlı düzlem çerçevenin dinamik tepkileri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen maksimum kat ivmeleri, maksimum kat yerdeğiştirmeleri Tablo 3.2 - 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin maksimum kat ivmeleri

	İvme (m/s^2)							
	1.kat	2. kat	3. kat	4. kat	5. kat	6. kat	7. kat	8. kat
ÜESS	-3,713	-3,719	-3,771	-3,670	-3,638	-3,812	-3,920	-4,091
Ankastre	1,974	-4,318	6,121	7,461	8,478	9,786	10,930	11,690

Yer hareketi olarak kullanılan 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin maksimum ivmesi $2.39 m/s^2$ 'dir; ancak ÜESS mesnet sisteminin bütün kayma durumlarını gösterebilmek için yer hareketi iki ile çarpılmıştır. Binanın geleneksel olarak bilinen ankastre tabanlı yapılması durumunda, yer hareketinden dolayı düzlem çerçeveye aktarılan ivmeler bina temelinden üst katlara doğru artmaktadır. Ayrıca bu ivmeler yer hareketi ivmesini oldukça aşmaktadır. Buna karşılık ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin ivmeleri, tabanından üst katlara doğru bir artış göstermekle birlikte her zaman yer hareketi ivmesinden daha düşük olmaktadır.

Tablo 3.3. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin maksimum kat yerdeğiştirmeleri

	Yerdeğiştirme (mm)								
	İzolator	1.kat	2. kat	3. kat	4. kat	5. kat	6. kat	7. kat	8. kat
ÜESS	410,8	416,1	424,9	434,1	441,9	448,3	454,6	458,8	461,2
Ankastre	-	13,0	36,3	63,9	91,3	117,0	146,5	167,8	179,4

Tablo 3.3'e bakılırsa ÜESS mesnet sisteminin yerdeğiştirme kapasitesini sismik izolasyonsuz duruma kıyasla daha büyükü olduğu dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, depremin periyodunun büyümesiyle yerdeğiştirmenin artması şeklinde açıklanabilir. Sismik izolasyon uygulandığı zaman periyot artacaktır dolayısıyla yerdeğiştirme artacaktır. Ancak sismik izolasyonlu yapılarda yerdeğiştirmenin büyük bir bölümü izolasyon seviyesinde gerçekleşmektedir. Böylece yapının üst kısmı rijit olarak hareket etmektedir.

Analizden elde edilen izolatorün maksimum yerdeğiştirmesi 410,8 mm'ye ulaşmaktadır. ÜESS mesneti 413,8 mm yerdeğiştirme kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan yer hareketinin maksimum yerdeğiştirmesi 424,70 mm'dir. Bu değer kaymanın ilk önce içteki 2 ve 3 yüzeyinde olduğunu gösterir. Mesnedin bu hareketi bahsedilen yüzeylerin 13,8 mm yerdeğiştirme kapasitesini kullanır ve bu yerdeğiştirme denklem (3.1) ve (3.2)'den elde edilir. Bu yerdeğiştirme kapasitesi 68 kN'a kadar olan yatay kuvvette geçerli olup denklem (3.5) ve (3.6)'dan elde edilir. Bir sonraki durumda 2 yüzeyinde hareket durur ve sürtünme kuvveti 68 kN ve 351,33 kN arasında kalıncaya kadar kayma 1 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir. Bu kuvvetler sırasıyla denklem (3.7) ve (3.8) ile elde edilir. Mesnetin daha sonraki hareket durumunda denklem (3.3) ile hesaplanan yerdeğiştirme yaklaşık 413,8 mm'ye ulaşabilir. Mesnetin en son hareket durumunda ise sürtünme kuvveti 351,33 kN'u aştığı zaman mesnet maksimum yerdeğiştirme kapasitesi olan 413,8 mm değerine ulaşır.

ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin katlar arasındaki yerdeğiştirme ortalama 6,3 mm, izolasyonsuz durumda ise 22,39 mm'dir. Bu durum düzlem çerçeve modelinde meydana gelecek kesit tesirlerini azaltmaktadır. Dolayısıyla düzlem çerçeve boyutları daha ekonomik olarak boyutlandırılabilir.

$$u_1 = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3} \quad (3.1)$$

$$u_{II} = u_I + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (3.2)$$

$$u_{III} = u_{II} + \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}}\right) d_1 - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (3.3)$$

$$u_{IV} = u_{III} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (3.4)$$

$$F_I = \mu_1 W \quad (3.5)$$

$$F_{II} = \mu_4 W \quad (3.6)$$

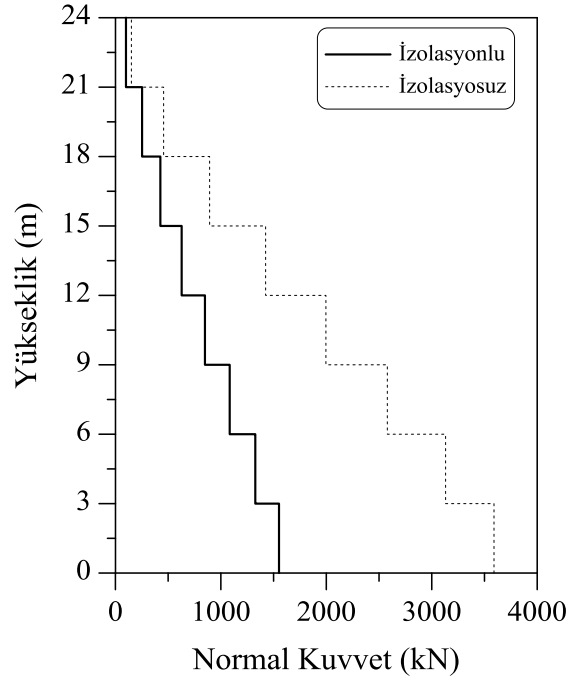
$$F_{III} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + \mu_1 W \quad (3.7)$$

$$F_{IV} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + \mu_4 W \quad (3.8)$$

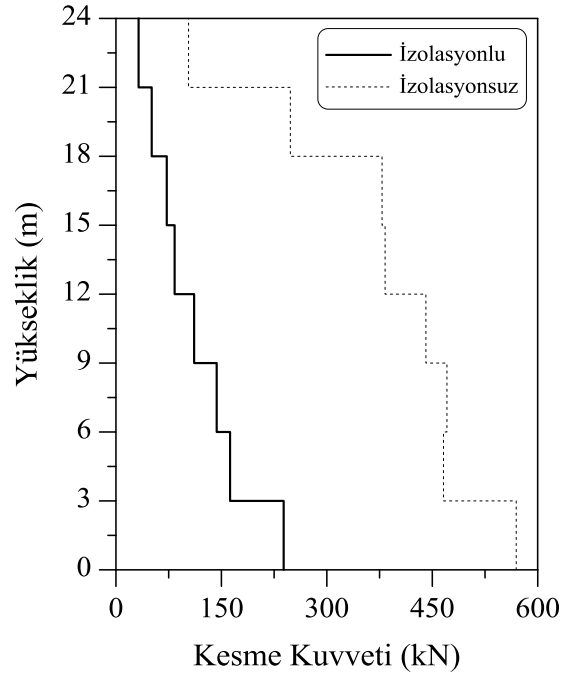
Burada, u_I , u_{II} , u_{III} ve u_{IV} farklı muhtemel hareket durumlarında yüzeylerde oluşan yerdeğiştirmelerdir. F_I , F_{II} , F_{III} ve F_{IV} ise farklı muhtemel hareket pozisyonlarında yüzeylerde oluşan kesme kuvvetleridir. Diğer parametreler daha önce açıklanmıştır.

3.2.3. Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

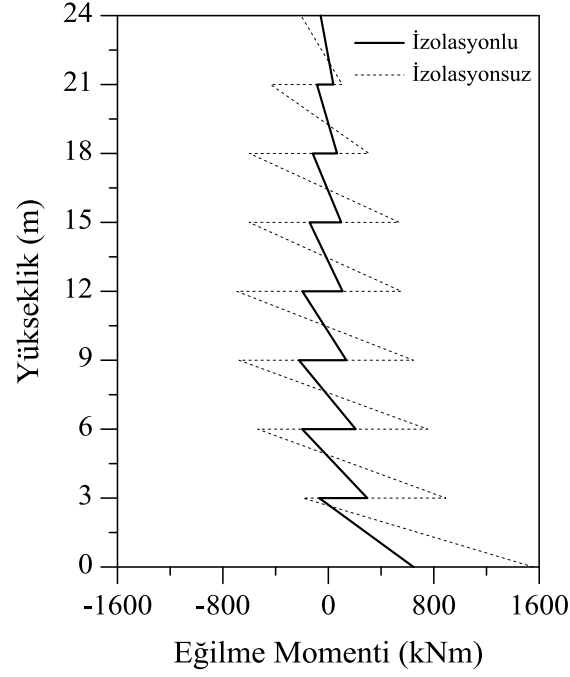
17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin GBZ000 yatay bileşeni kullanarak her bir kattaki kolonlarda meydana gelen kesme kuvveti, normal kuvvet, eğilme momenti ve taban kesme kuvvetleri hesaplanarak karşılaştırılması Şekil 3.18–3.21’de gösterilmiştir.



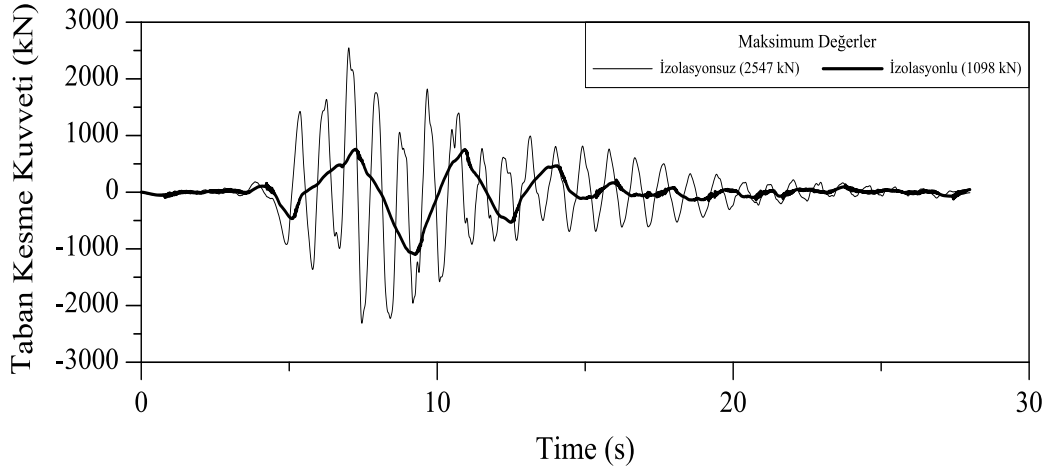
Şekil 3.18. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen normal kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.19. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.20 Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin yüksekliği boyunca değişen eğilme momentlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.21. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.2.3.1. Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetlerinin İrdelenmesi

Tablo 3.4'e bakıldığında sismik izolasyonlu düzlem çerçevedeki normal kuvvetler izolasyonsuz olarak modellenen duruma oranla %34 - %58 arasında daha küçüktür.

Tablo 3.5'e bakıldığında sismik izolasyonlu düzlem çerçevedeki kesme kuvvetleri izolasyonsuz olarak modellenen duruma kıyasla %60 - %81 arasında daha küçüktür.

Sismik izolasyonlu düzlem çerçeve kolonlarının alt ve üst kısmındaki eğilme momentleri izolasyonsuz olarak modellenen duruma oranla yaklaşık olarak sırasıyla %64-%82 ve %63 - %80 arasında daha küçük olduğu Tablo 3.6'dan görülmektedir.

Düzlem çerçevenin toplam ağırlığı 4540 kN olup sismik izolasyonlu düzlem çerçevede maksimum taban kesme kuvveti 0,24 W olarak elde edilir. İzolasyonsuz durumda ise 0,56 W olarak elde edilir. Dolayısıyla taban kesme kuvveti sismik izolasyonlu düzlem çerçevede izolasyonsuz duruma oranla %57 daha küçüktür.

Yukarıda verilen sayısal karşılaştırmalardan da görüldüğü üzere ÜESS mesnet sistemi ile izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin normal kuvvetleri, kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve taban kesme kuvvetleri izolasyonsuz duruma göre oldukça küçüktür.

Tablo 3.4. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum normal kuvvetleri

	Normal Kuvvet (kN)							
	1.kat	2. kat	3. kat	4. kat	5. kat	6. kat	7. kat	8. kat
ÜESS	1552	1327	1084	849	628	426	253	100
Ankastre	3590	3131	2579	1996	1425	893	457	152

Tablo 3.5. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum kesme kuvvetleri

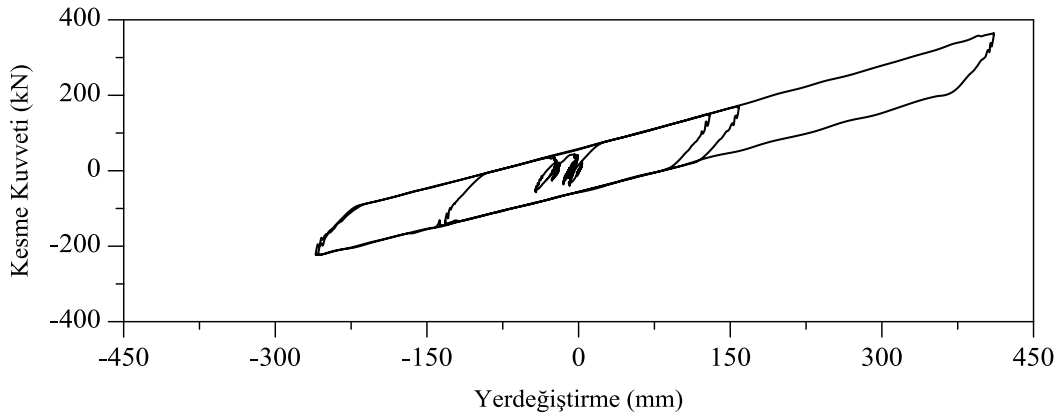
	Kesme Kuvveti (kN)									
	Taban	İzolator	1. kat	2. kat	3. kat	4. kat	5. kat	6. kat	7. kat	8. kat
ÜESS	1098	365	239	162	143	111	84	72	51	32
Ankastre	2547	-	569	466	470	441	383	379	248	103

Tablo 3.6. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum eğilme momentleri

	Eğilme Momenti (kNm)								
	Kolon	1.kat	2. kat	3. kat	4. kat	5. kat	6. kat	7. kat	8. kat
ÜESS	Üst	-69,4	-198,5	-222,6	-196,9	142,4	118,6	86,5	58,5
	Alt	646,4	295,5	207,4	136,9	-108,0	-98,2	-66,3	-38,0
Ankastre	Üst	192	535,4	677,7	693,8	600,9	597,7	438,3	206,8
	Alt	-1555,7	-892,1	-752,7	-644,8	-555,3	-539,4	-308,8	-105,9

3.2.4. İzolatörde Meydana Gelen Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme Arasındaki İlişki

SSM sistemleri doğrusal olmayan bir davranış sergilerler. İzolatöre gelen kesme kuvveti ile izolatörün yerdeğiştirmesi arasındaki doğrusal olmayan bu ilişki şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnedinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

3.2.4.1. İzolatörde Meydana Gelen Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme Arasındaki İlişkinin İrdelenmesi

ÜESS mesnet seviyesindeki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisini gösteren Şekil 3.22’deki döngünün davranışı histeretik olarak tanımlanır. Her bir döngüdeki enerji tükettiği döngünün altındaki alana eşittir. Bu alan sayesinde mesnetin etkili sönümü hesaplanabilir. Alanın büyük veya küçük olması ÜESS mesnet sisteminin emdiği enerjiyi göstermektedir.

3.3. Zemin-Yapı Etkileşimi İçeren 8 Katlı Düzlem Çerçeve İçin Elde Edilen Bulgular

Dinamik dış yük olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli Gebze İstasyonu'nun GBZ000 yatay bileşeni yer hareketi olarak kullanılmıştır (PEER, 2009). 8 katlı düzlem çerçeve sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz mesnetli olarak modellenip analizleri; sert, orta ve sıkı zeminler için ayrı ayrı yapılmıştır. Analizlerde düzlem çerçevenin kendi ağırlığı ve döşemelerden gelen hareketli yükler düğüm noktalarına aktarılmıştır. Analizler sonucundan elde edilen periyotlar, kat seviyelerinde meydana gelen yerdeğiştirmeler, ivmeler, katlara ait kolonlarda meydana gelen kesme kuvvetleri, normal kuvvetler, eğilme momentleri ve taban kesme kuvvetleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Ayrıca kolon altına yerleştirilen izolatördeki yerdeğiştirme ve izolatöre gelen kesme kuvveti-yerdeğiştirme arasındaki ilişki de her üç zemin sınıfı için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

3.3.1. Yumuşak, Orta ve Sert Zemin Sınıfları İçin Sismik İzolasyonlu ve İzolasyonsuz Düzlem Çerçevenin Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Periyotlar

Zemin-yapı etkileşimi içeren düzlem çerçevenin yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için ayrı ayrı yapılan analiz sonuçlarından elde edilen periyotlar Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin üç ayrı zemin sınıfı için yapılan analiz sonuçlarından elde edilen periyotları

Mod	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen		Zemin-yapı etkileşimi içeren					
	İzolasyonlu	İzolasyonsuz	İzolasyonlu			İzolasyonsuz		
			Periyot (s)			Periyot (s)		
	Periyot (s)		Yumuşak	Orta	Sert	Yumuşak	Orta	Sert
1	3,219	0,885	3,262	3,241	3,243	1,140	1,073	1,065
2	0,482	0,306	0,412	0,387	0,383	0,363	0,356	0,356
3	0,228	0,169	0,190	0,158	0,158	0,194	0,191	0,191
4	0,159	0,119	0,158	0,157	0,157	0,194	0,129	0,129
5	0,158	0,106	0,158	0,139	0,131	0,157	0,128	0,118

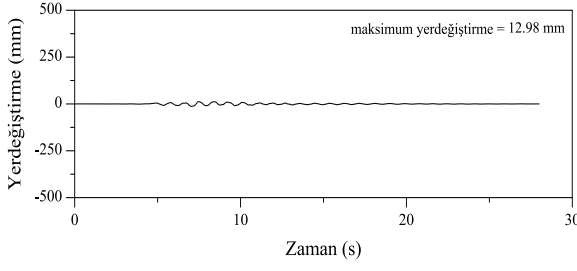
3.3.1.1. Periyotların İrdelenmesi

Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçeve modelinde yapılan analizlerden elde edilen ilk 5 periyot Tablo 3.7’de verilmiştir. Bu tablodan aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

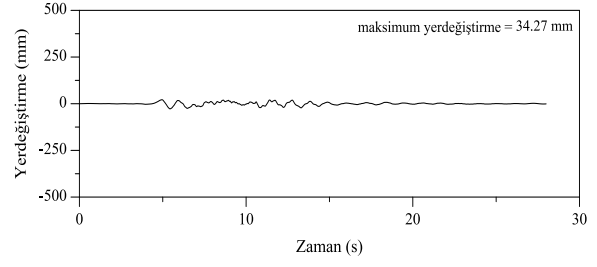
Zemin-yapı etkileşimi içermeyen izolasyonsuz düzlem çerçevenin hakim periyodu zemin-yapı etkileşimi içeren izolasyonsuz mesnetli düzlem çerçeveninkinden daha küçük olduğu görülmektedir. Ankastre mesnetli çerçevede zemin-yapı etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda, sert zemin üzerine modellenen düzlem çerçevenin hakim periyodunun en küçük olduğu görülmektedir. Yumuşak, orta ve sert zemin üzerine modellenen sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin hakim periyotları neredeyse birbirine yakındır. Yani hakim periyotlar zemin rijitliği değişiminden bağımsızdır. Ancak izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları, zeminin rijitliği arttıkça azalır. Yani sert zemin üzerine modellenen izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları zemin-yapı etkileşimi içermeyen izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotlarına yaklaşım eğiliminde olur.

3.3.2. Maksimum Kat Yerdeğiştirmelerinin, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnet Sisteminin Yerdeğiştirmesi

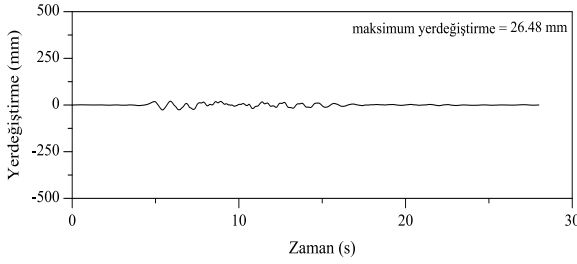
Yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen kat seviyelerindeki yerdeğiştirme karşılaştırmalarının gösterimi Şekil 3.23-3.54’de verilmiştir. Ayrıca ÜESS mesnetinin üç ayrı zemin durumuna göre yerdeğiştirmesi Şekil 3.55’de verilmiştir.



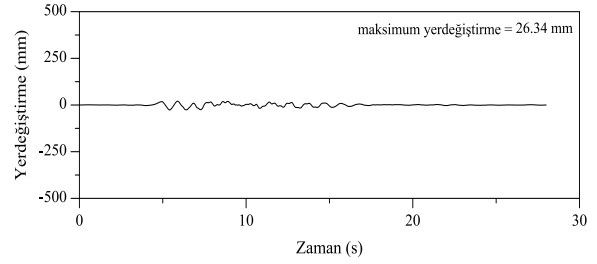
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

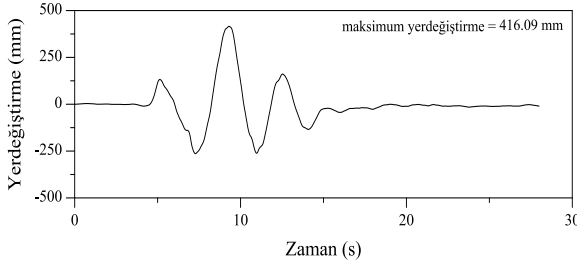


c) Orta zemin

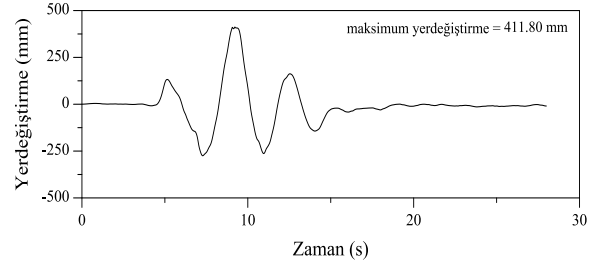


d) Sert zemin

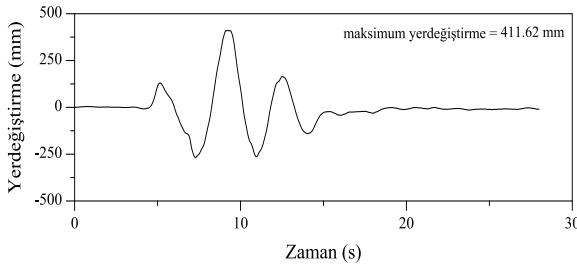
Şekil 3.23. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



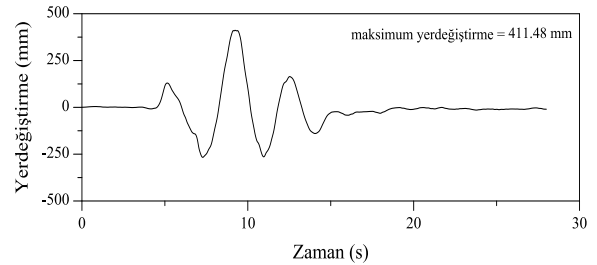
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

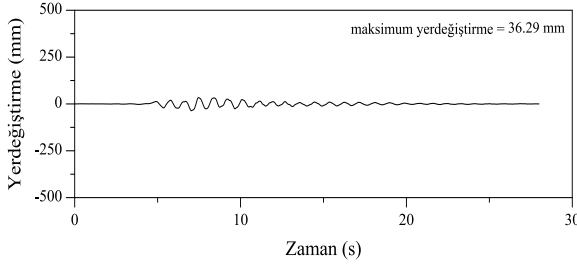


c) Orta zemin

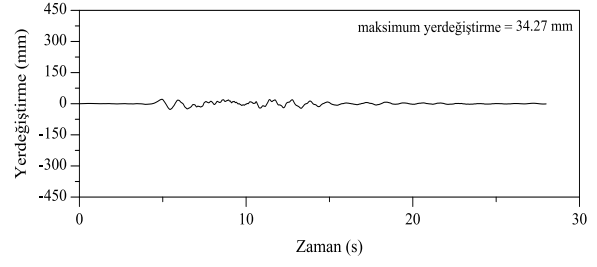


d) Sert zemin

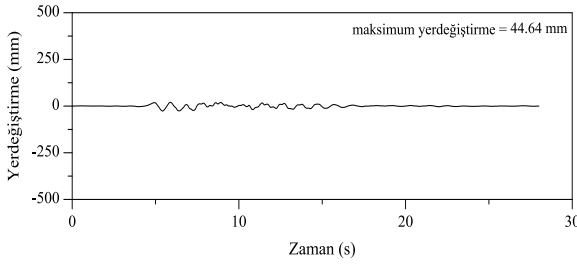
Şekil 3.24. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



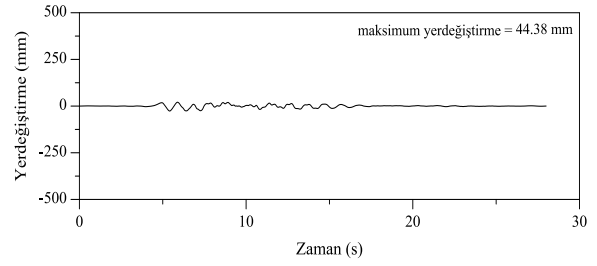
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

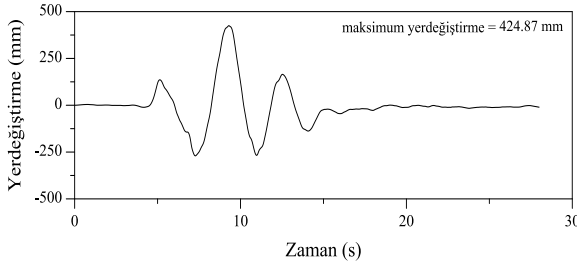


c) Orta zemin

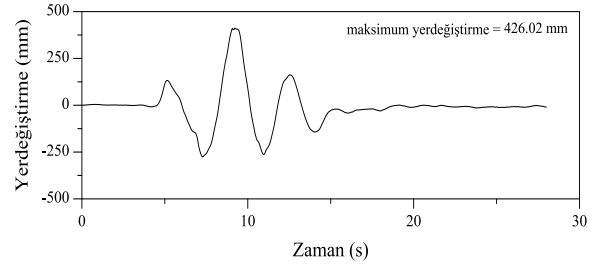


d) Sert zemin

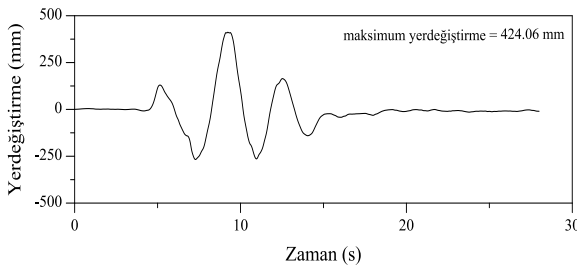
Şekil 3.25. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



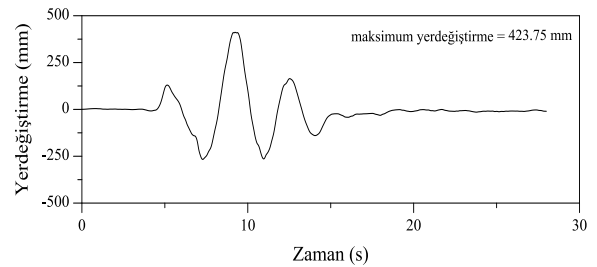
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

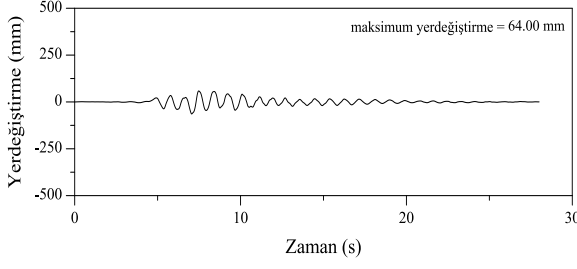


c) Orta zemin

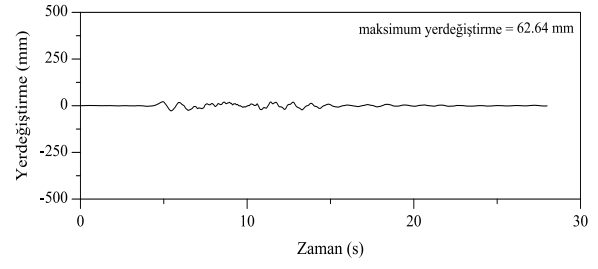


d) Sert zemin

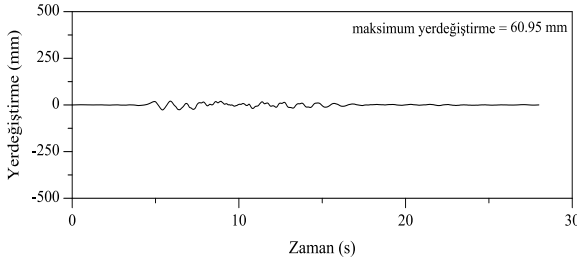
Şekil 3.26. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



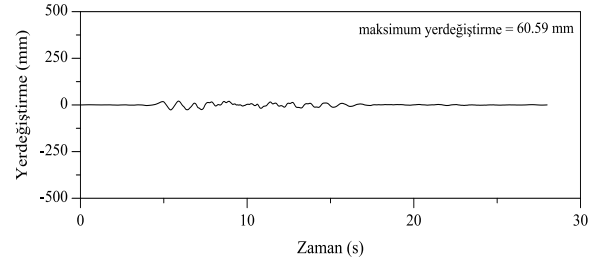
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

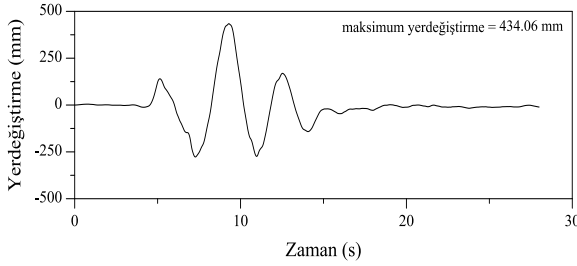


c) Orta zemin

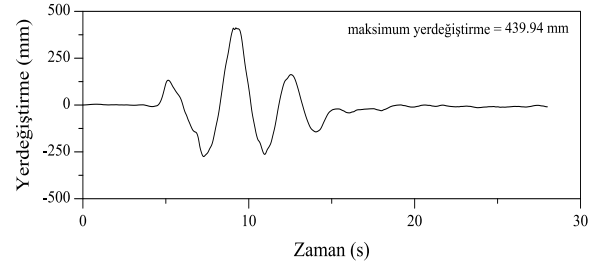


d) Sert zemin

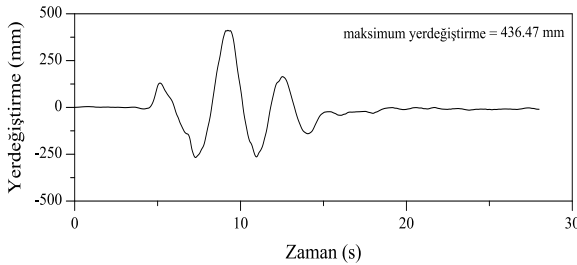
Şekil 3.27. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



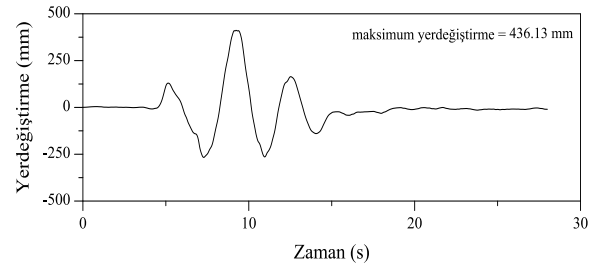
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

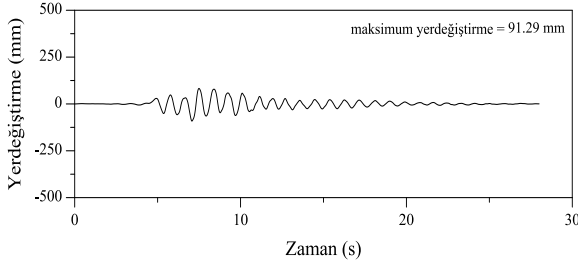


c) Orta zemin

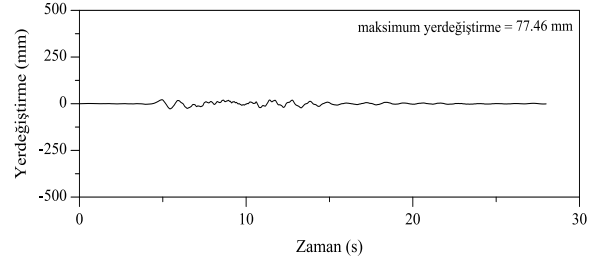


d) Sert zemin

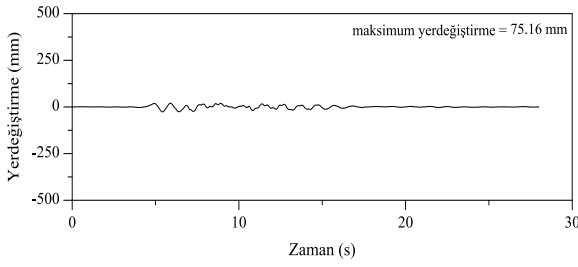
Şekil 3.28. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



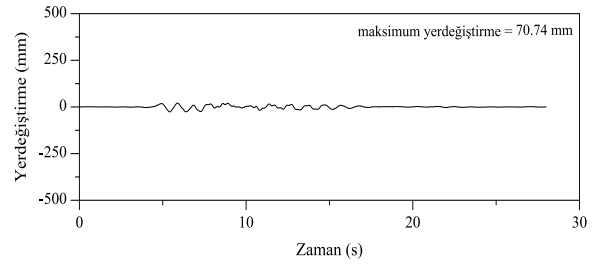
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

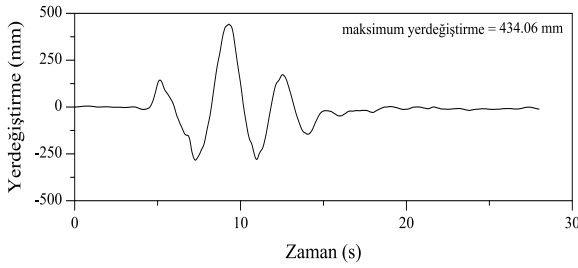


c) Orta zemin

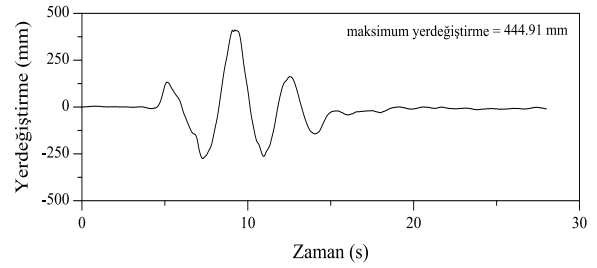


d) Sert zemin

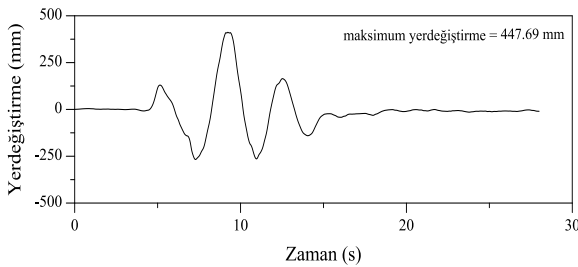
Şekil 3.29. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



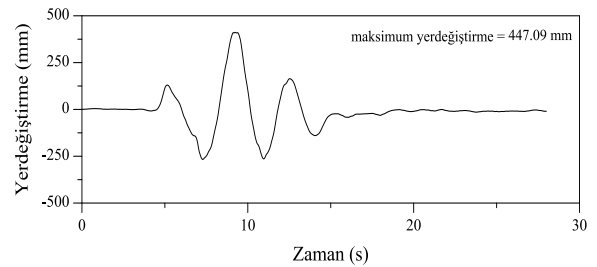
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

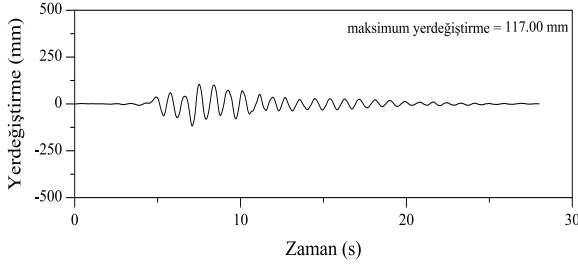


c) Orta zemin

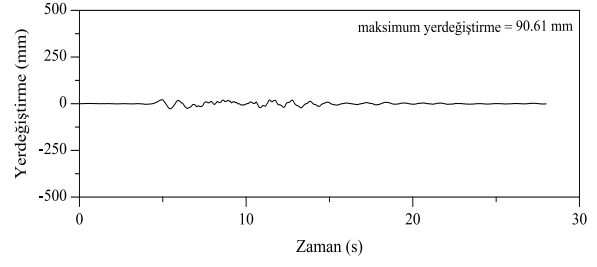


d) Sert zemin

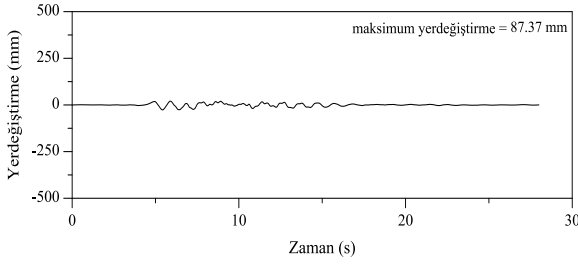
Şekil 3.30. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



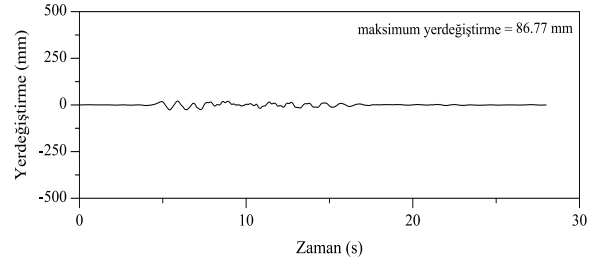
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

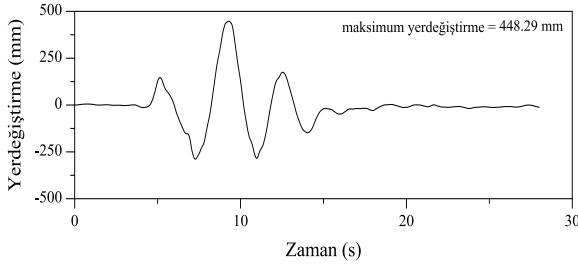


c) Orta zemin

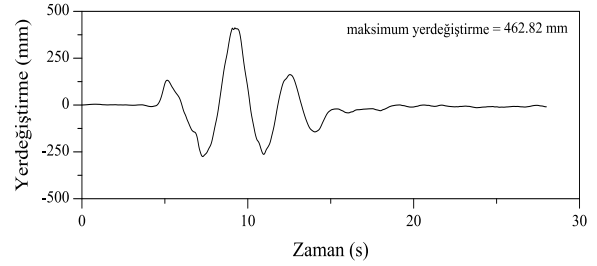


d) Sert zemin

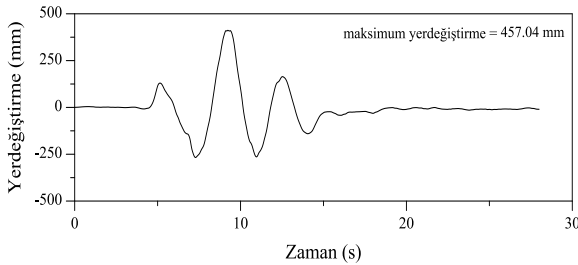
Şekil 3.31 Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



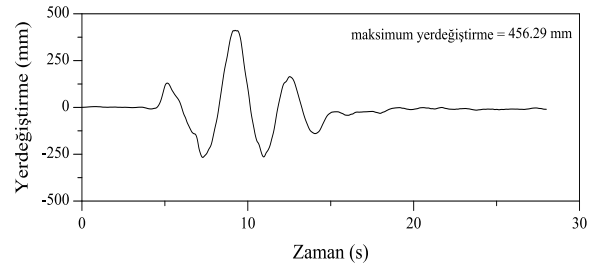
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

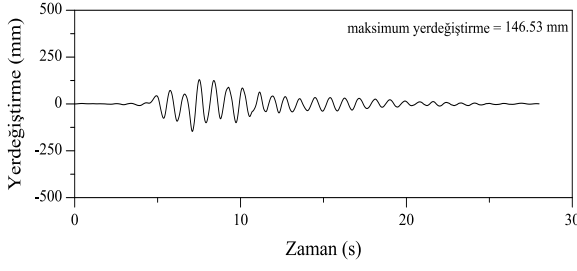


c) Orta zemin

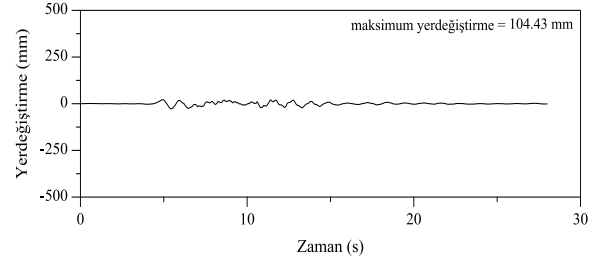


d) Sert zemin

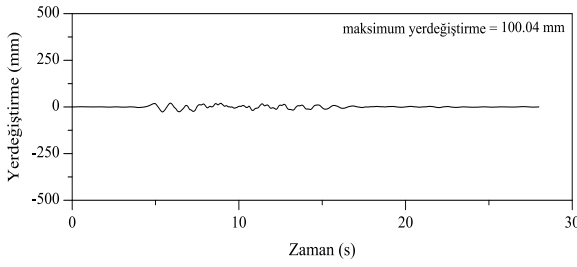
Şekil 3.32. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



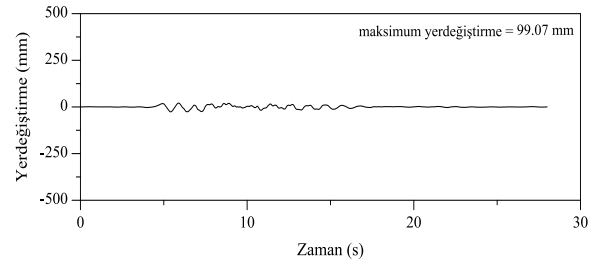
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

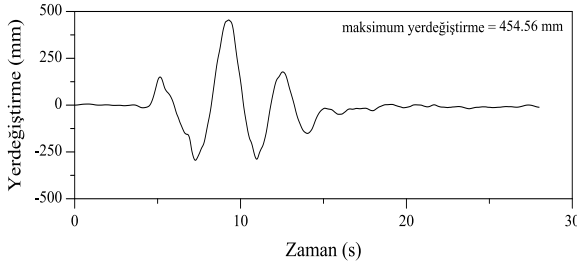


c) Orta zemin

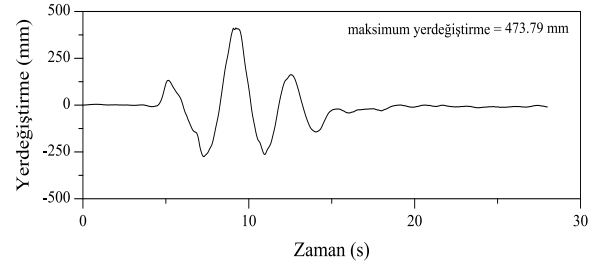


d) Sert zemin

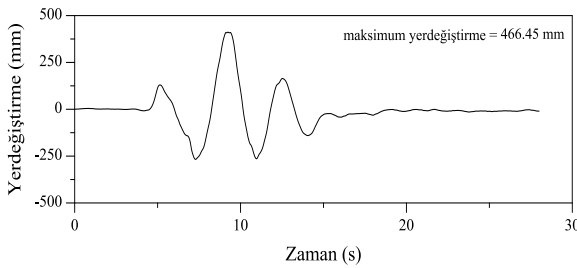
Şekil 3.33. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



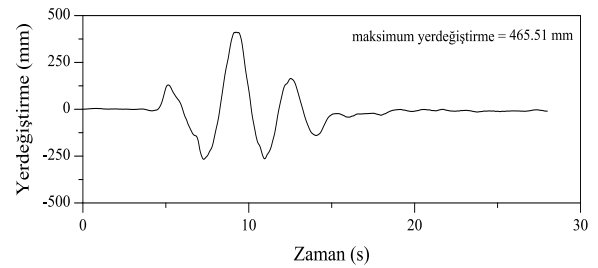
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

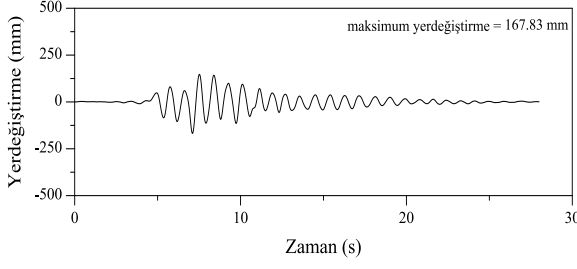


c) Orta zemin

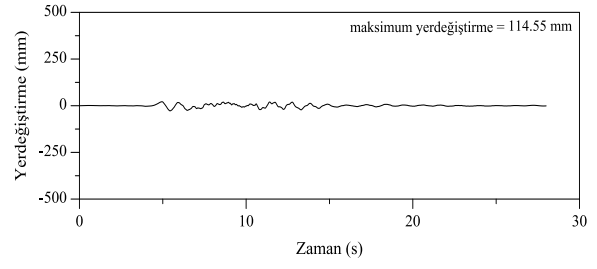


d) Sert zemin

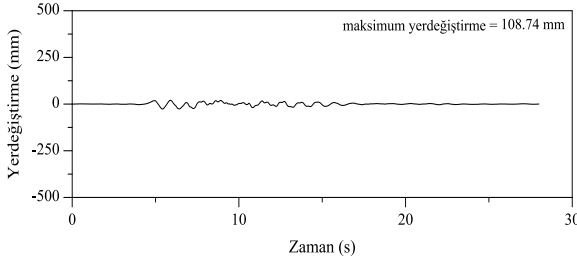
Şekil 3.34. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



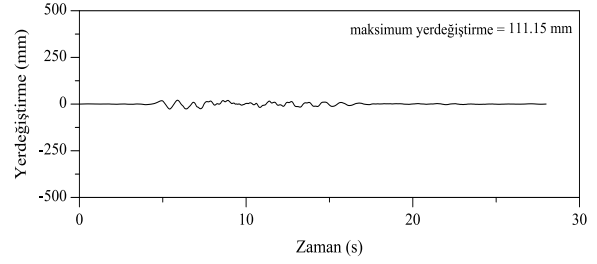
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

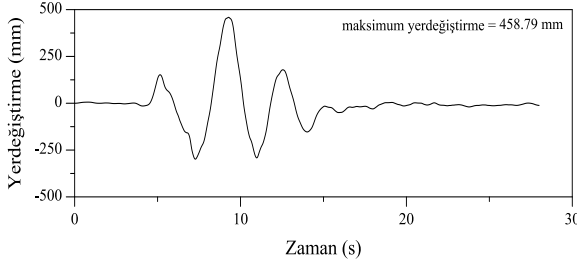


c) Orta zemin

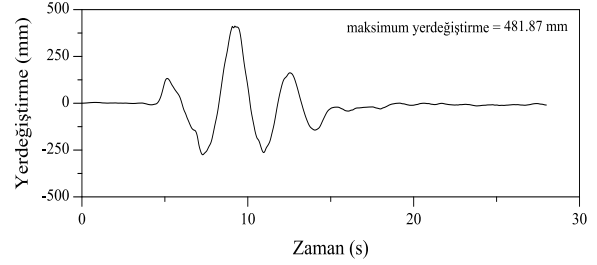


d) Sert zemin

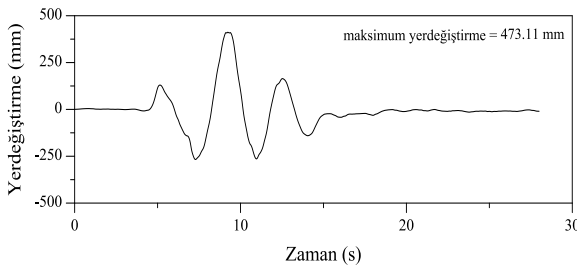
Şekil 3.35. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması



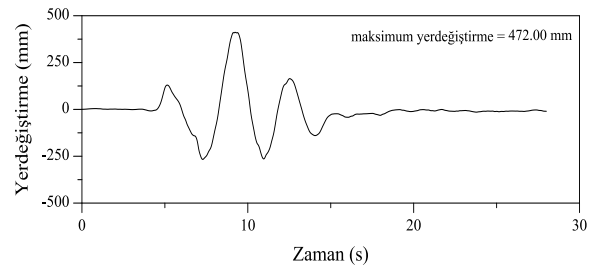
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

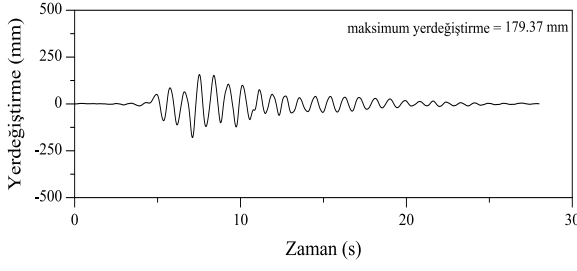


c) Orta zemin

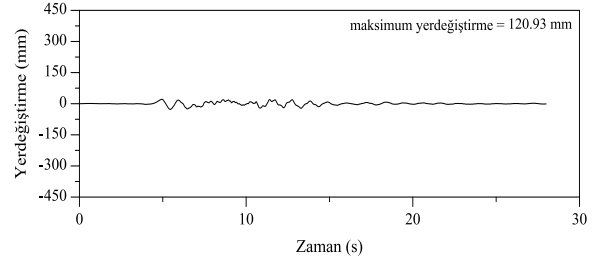


d) Sert zemin

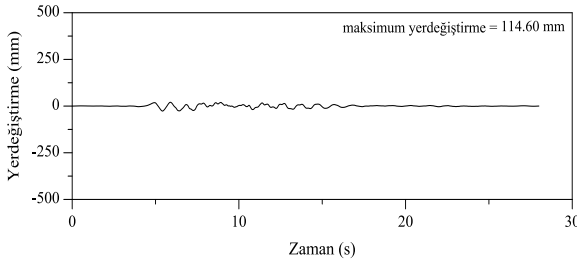
Şekil 3.36. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması



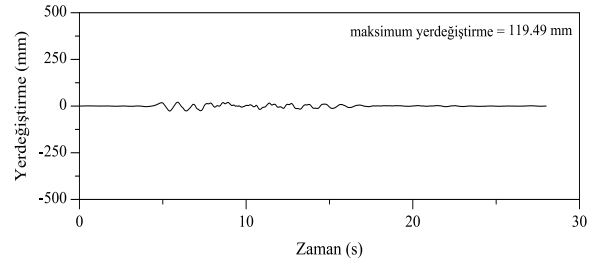
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

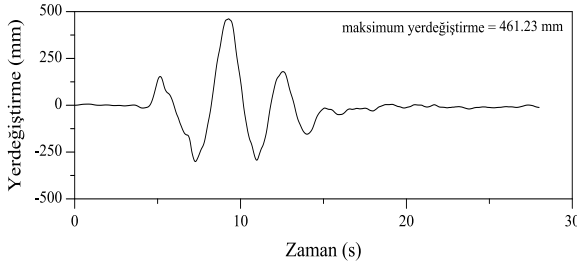


c) Orta zemin

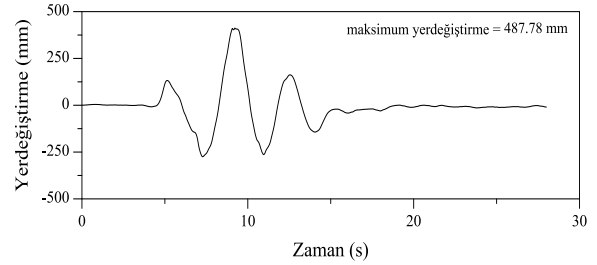


d) Sert zemin

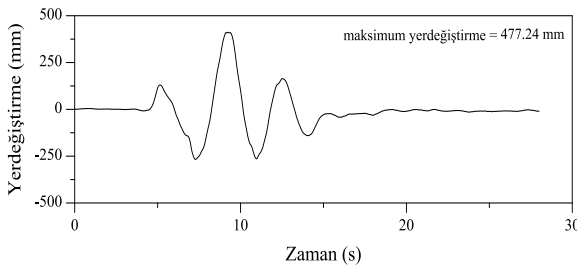
Şekil 3.37. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



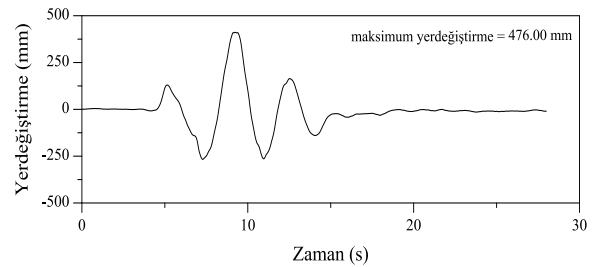
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

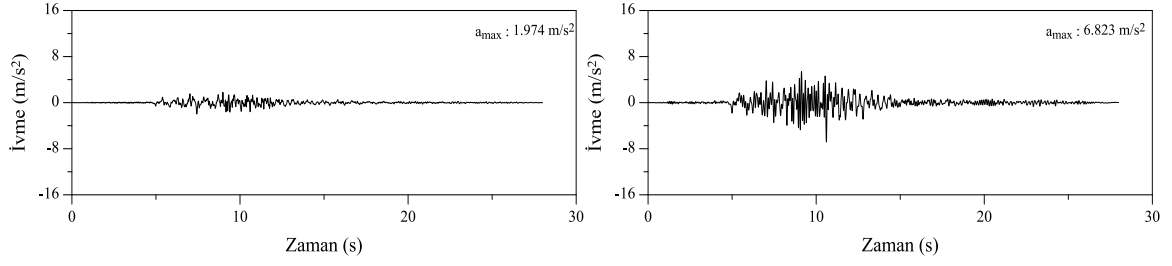


c) Orta zemin



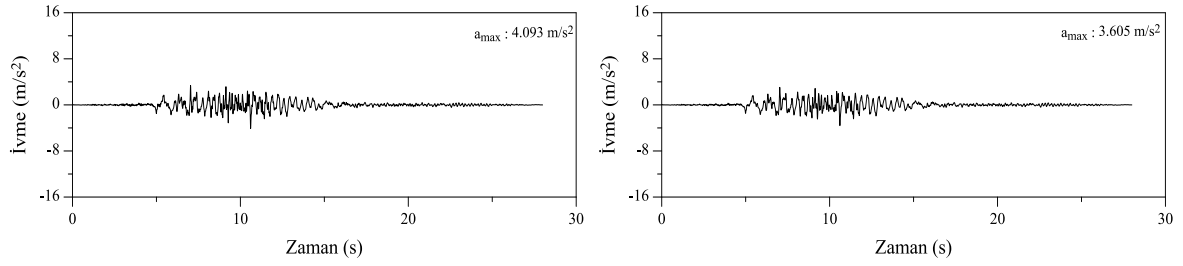
d) Sert zemin

Şekil 3.38. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması



a) Rijit zemin

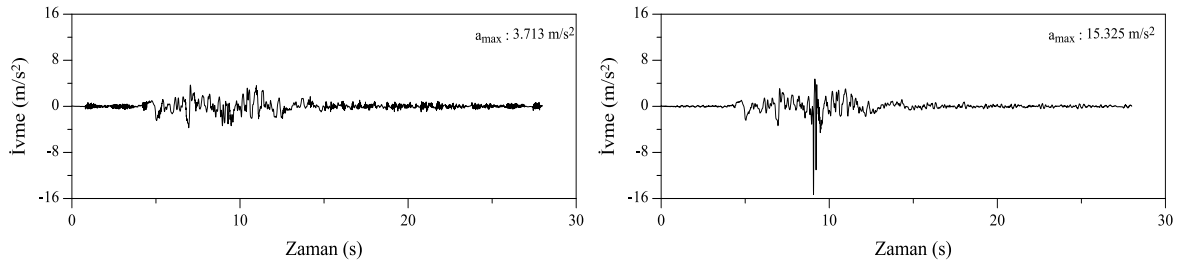
b) Yumuşak zemin



c) Orta zemin

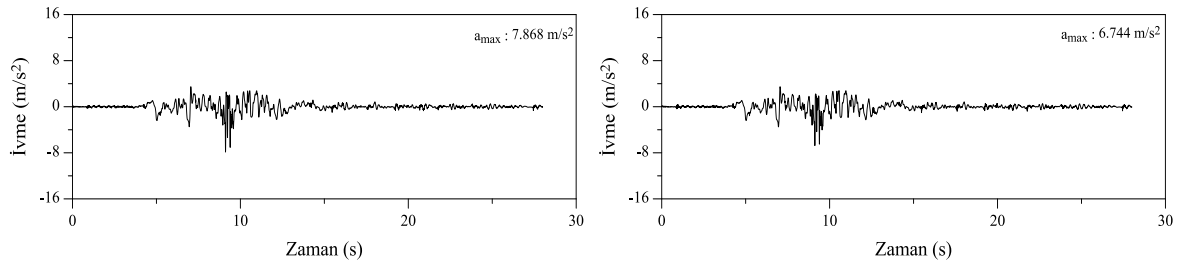
d) Sert zemin

Şekil 3.39. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



a) Rijit zemin

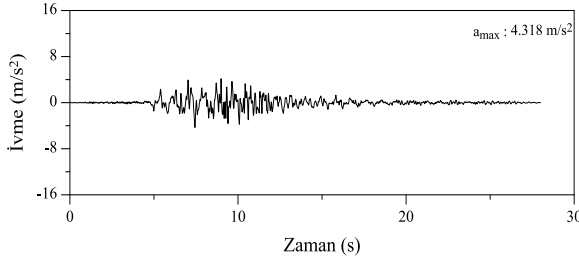
b) Yumuşak zemin



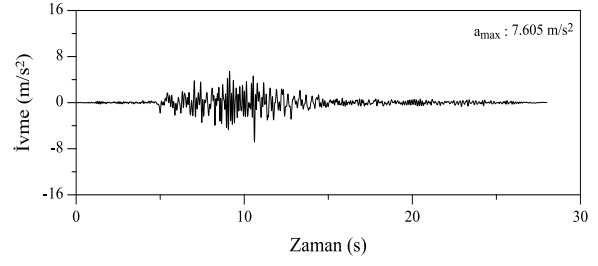
c) Orta zemin

d) Sert zemin

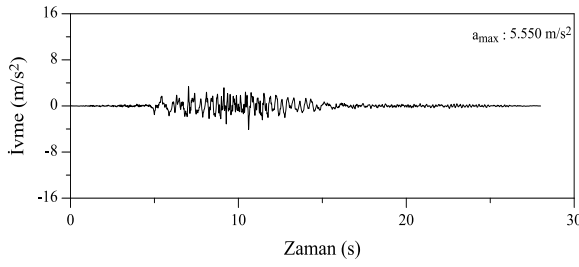
Şekil 3.40. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 1. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



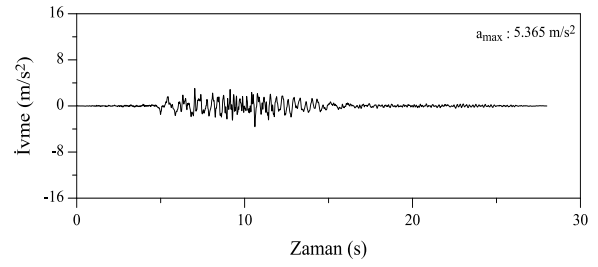
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

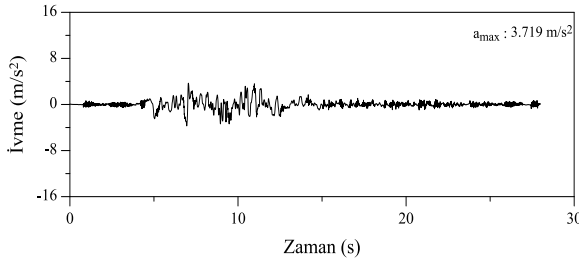


c) Orta zemin

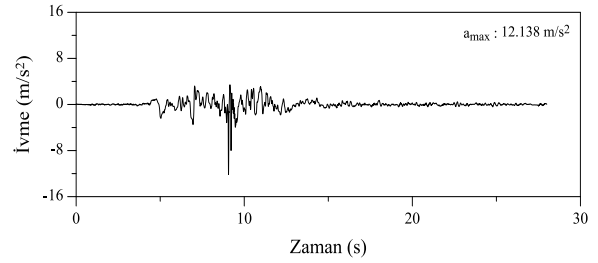


d) Sert zemin

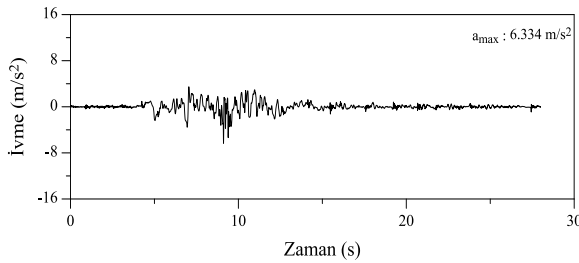
Şekil 3.41. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



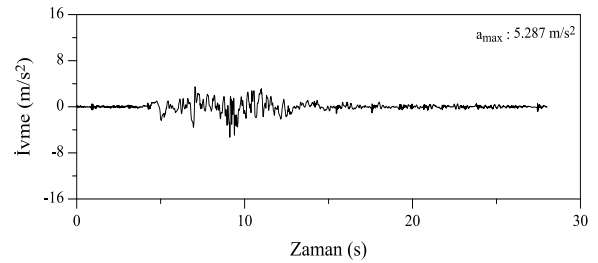
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

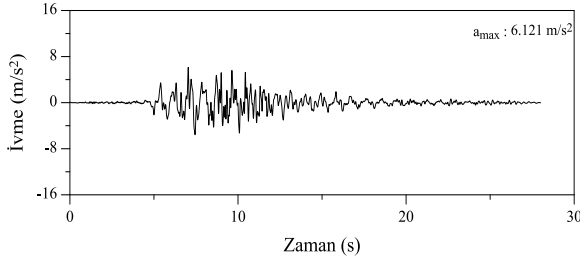


c) Orta zemin

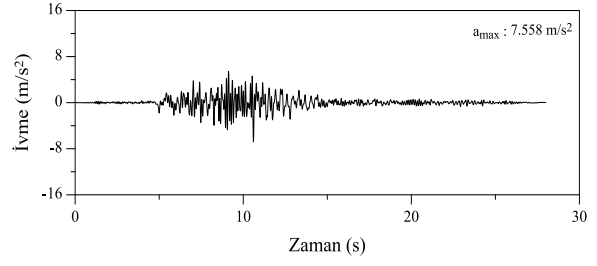


d) Sert zemin

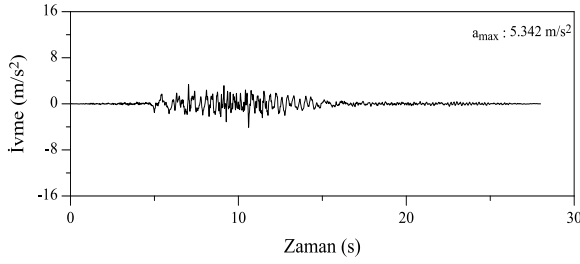
Şekil 3.42. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 2. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



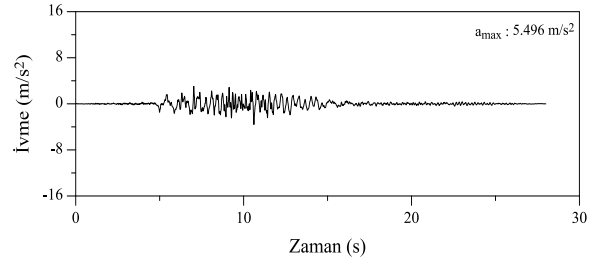
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

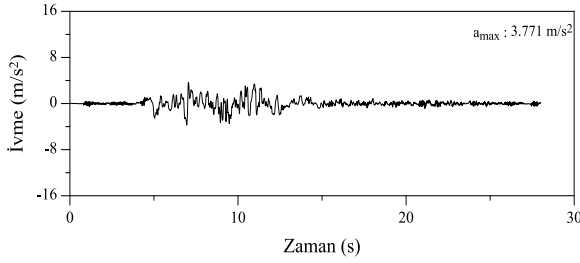


c) Orta zemin

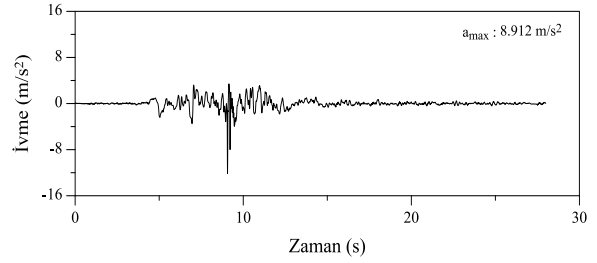


d) Sert zemin

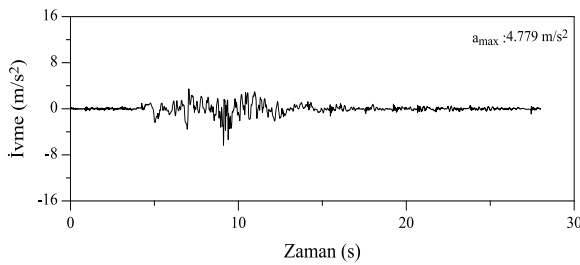
Şekil 3.43. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



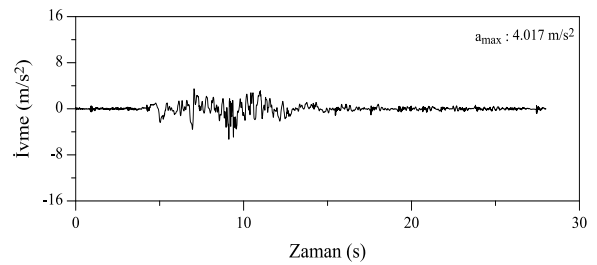
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

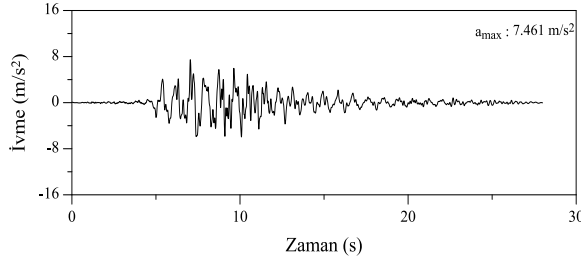


c) Orta zemin

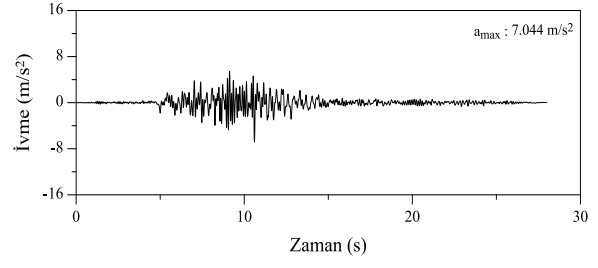


d) Sert zemin

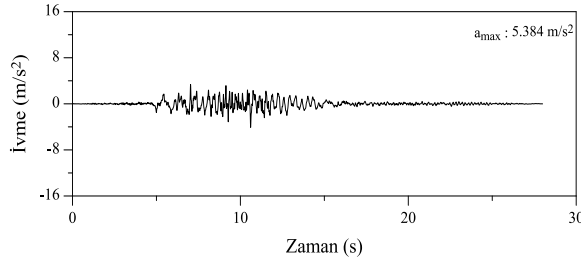
Şekil 3.44. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 3. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



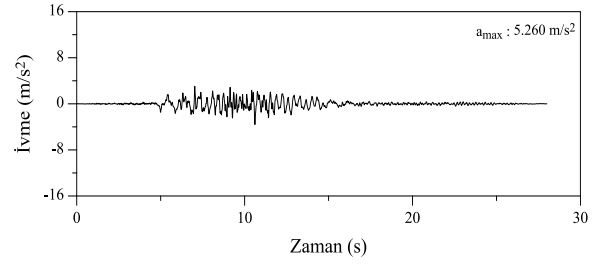
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

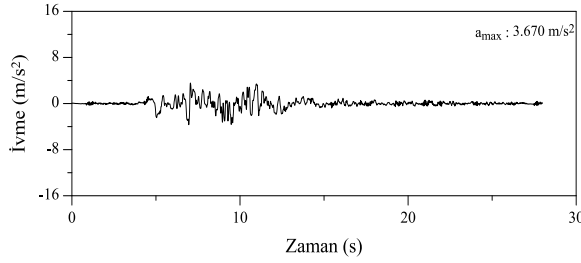


c) Orta zemin

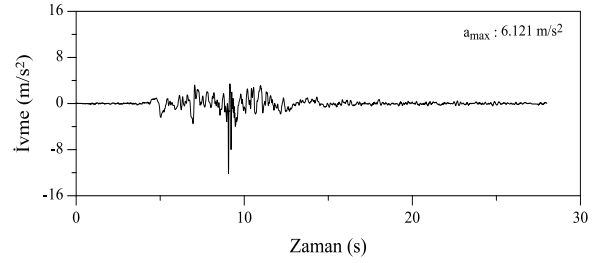


d) Sert zemin

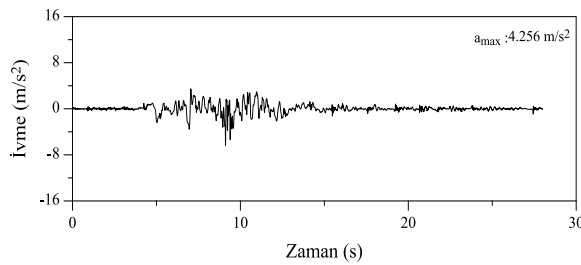
Şekil 3.45. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



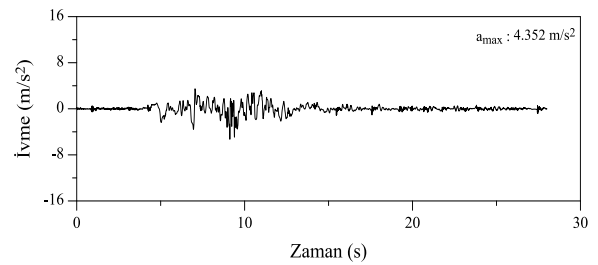
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

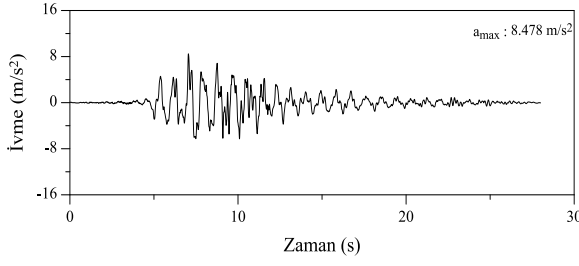


c) Orta zemin

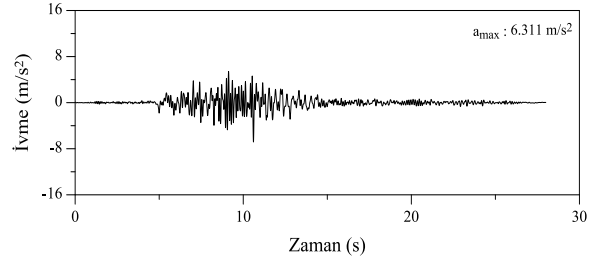


d) Sert zemin

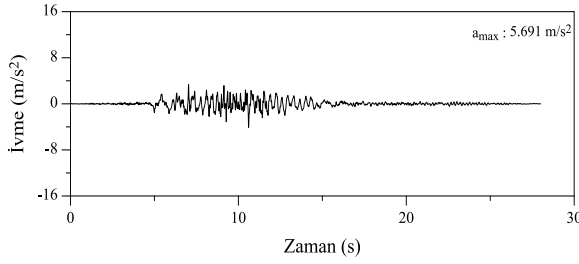
Şekil 3.46. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 4. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



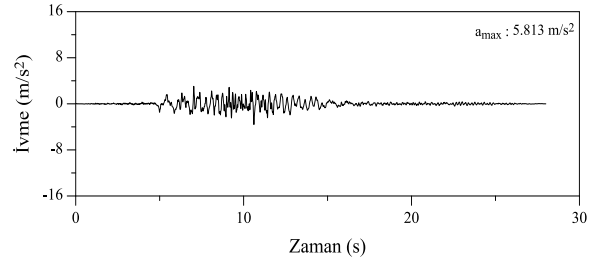
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

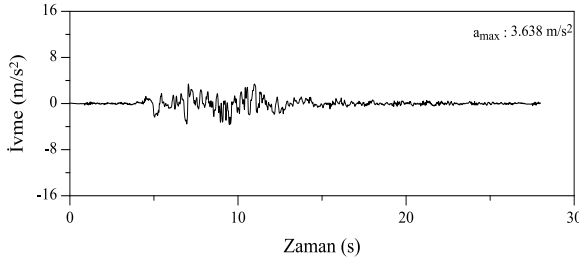


c) Orta zemin

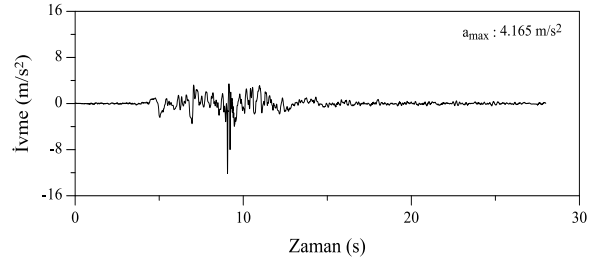


d) Sert zemin

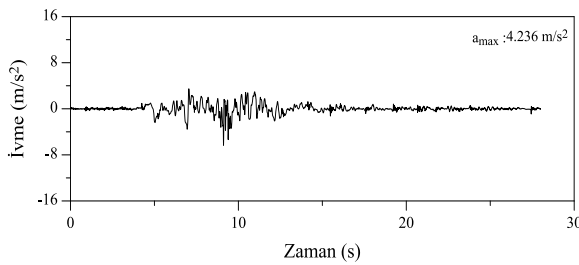
Şekil 3.47. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



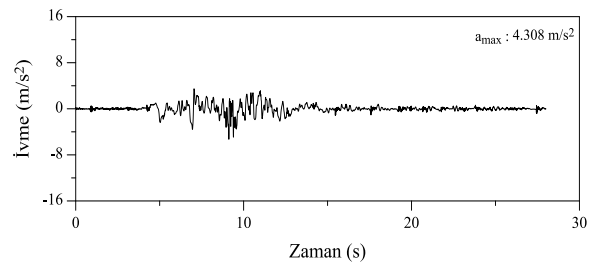
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

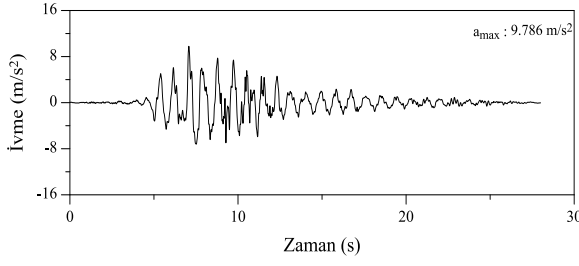


c) Orta zemin

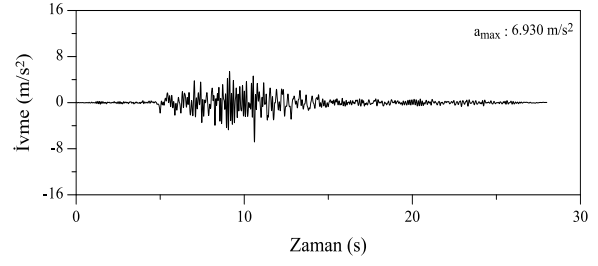


d) Sert zemin

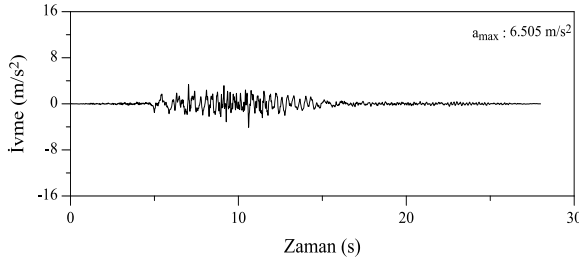
Şekil 3.48. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 5. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



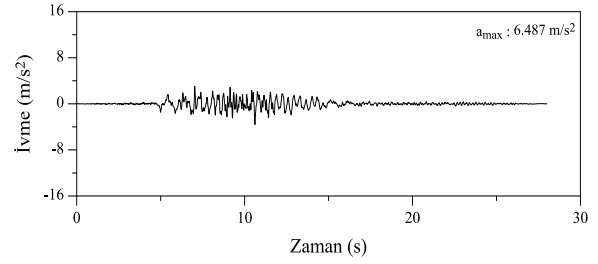
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

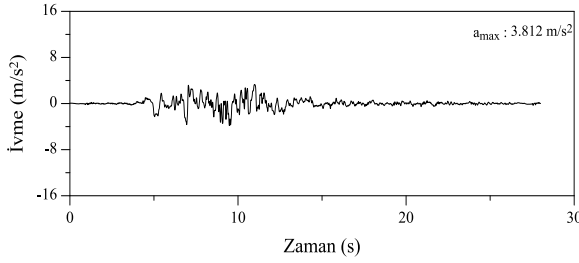


c) Orta zemin

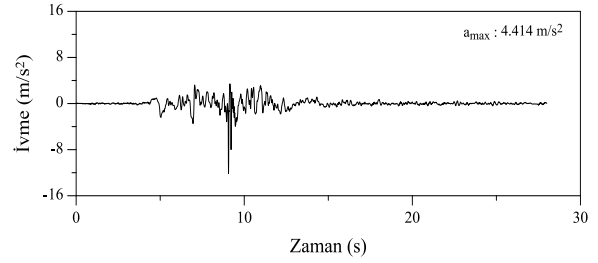


d) Sert zemin

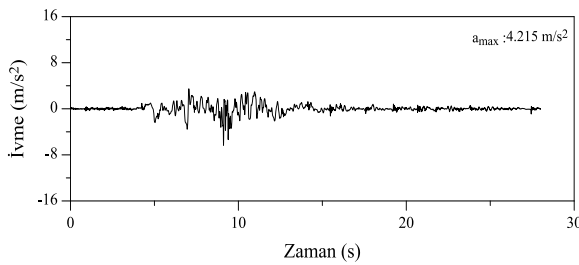
Şekil 3.49. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



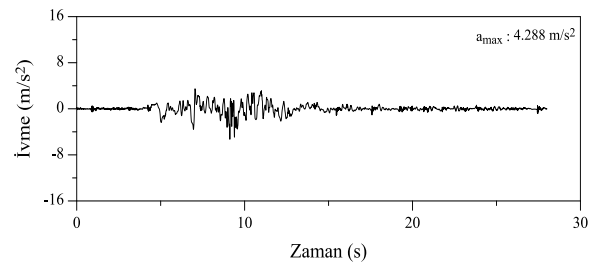
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

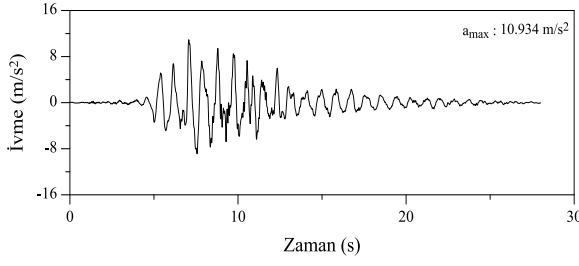


c) Orta zemin

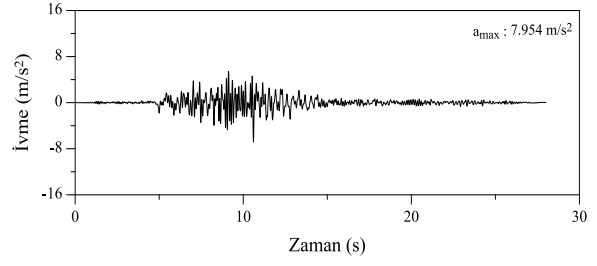


d) Sert zemin

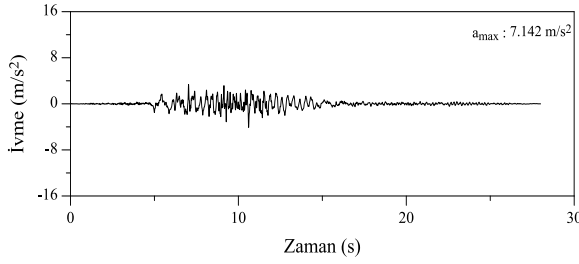
Şekil 3.50. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 6. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



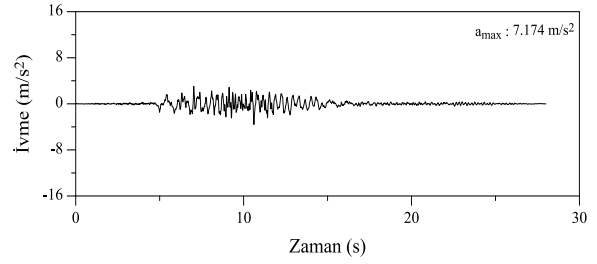
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

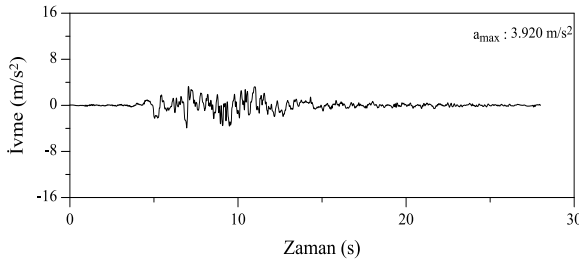


c) Orta zemin

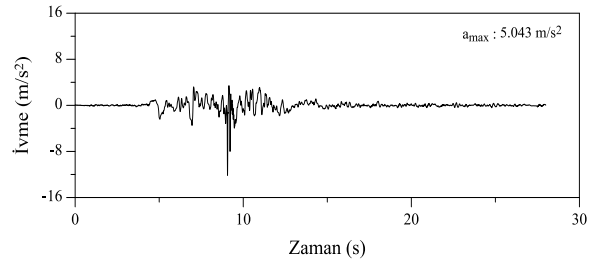


d) Sert zemin

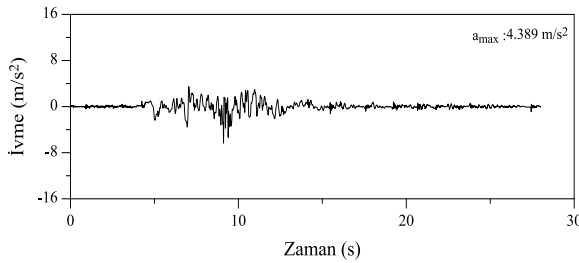
Şekil 3.51. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



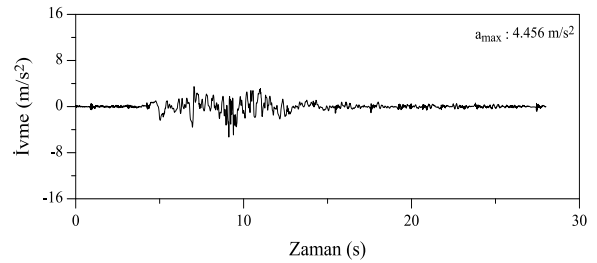
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

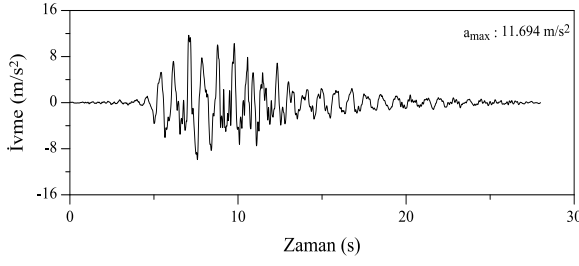


c) Orta zemin

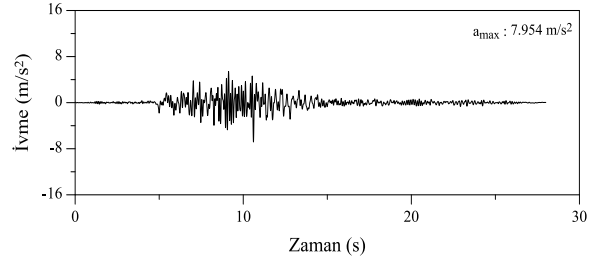


d) Sert zemin

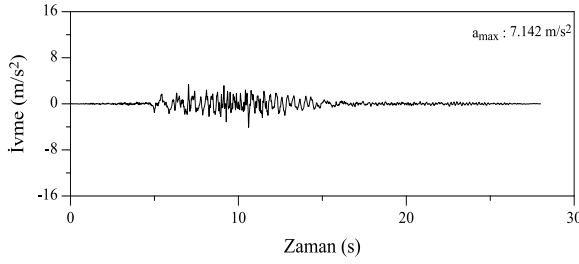
Şekil 3.52. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 7. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



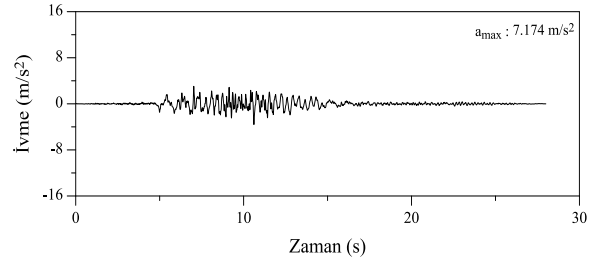
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

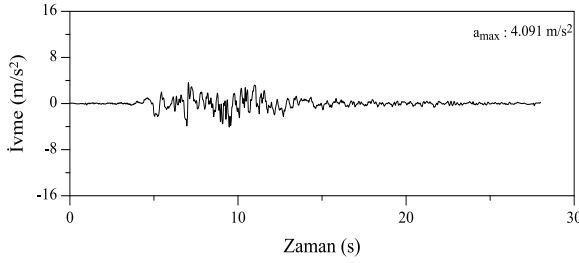


c) Orta zemin

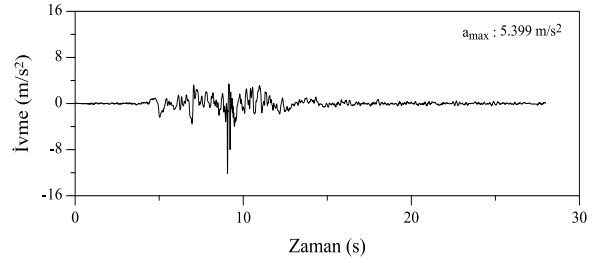


d) Sert zemin

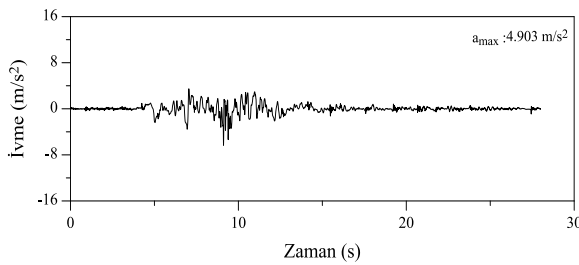
Şekil 3.53. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



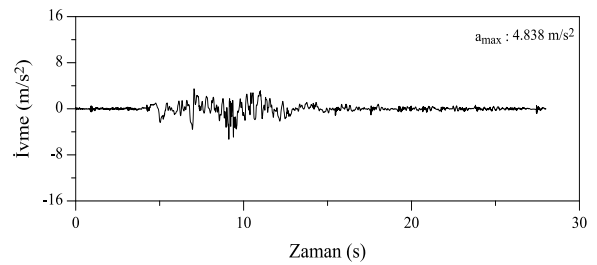
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

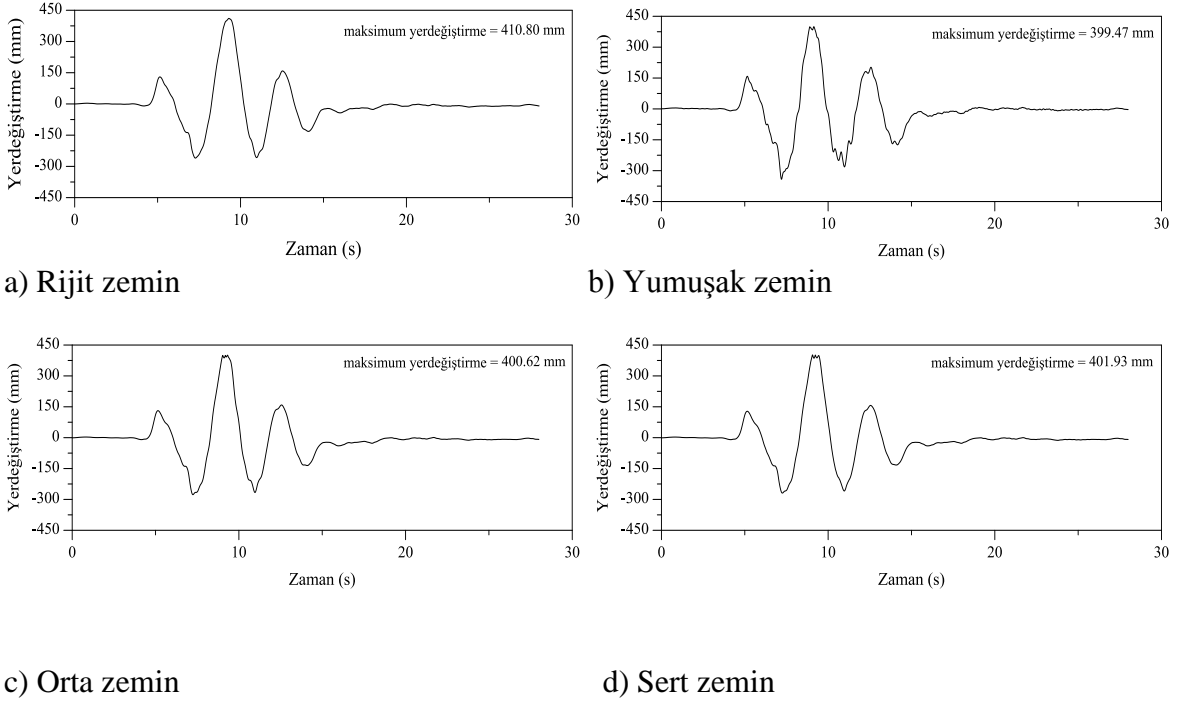


c) Orta zemin



d) Sert zemin

Şekil 3.54. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin 8. kat seviyesindeki ivmelerinin karşılaştırılması



Şekil 3.55. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren üç zemin sınıfı için düzlem çerçevenin sismik izolasyonunda kullanılan ÜESS mesnetlerinin yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması

3.3.2.1. Maksimum Kat Yerdeğıştirmelerinin, Kat İvmelerinin Karşılaştırılması ve ÜESS Mesnet Sisteminin Yerdeğıştirmesinin İrdelenmesi

Yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için ÜESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen dinamik tepkiler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen maksimum kat ivmeleri ve maksimum kat yerdeğıştirmeleri Tablo 3.8-3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9 ve Şekil 3.39–3.54 kat seviyelerindeki yapısal ivmeleri karşılaştırma olanağı sunmaktadır. Yumuşak zemin üzerinde modellenmiş düzlem çerçeve, orta ve sıkı zemin durumlarına kıyasla yer ivmelerine daha fazla duyarlıdır. Bu sonuç, sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçeveler için tutarlıdır; ancak izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyeleri boyunca ivmeleri arttığında deprem izolasyon teknikleri kullanılmasıyla düzlem çerçeveye aktarılan bu ivmeler azaltılmaktadır.

Ayrıca yapının yüksekliği arttıkça zemin-yapı etkileşimi içermeyen izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki ivmeler, zemin-yapı etkileşimi içerenlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 3.8. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen maksimum kat ivmeleri

Kat No	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen durum		İzolasyonsuz (m/s^2)			ÜESS (m/s^2)		
	İzolasyonsuz (m/s^2)	ÜESS (m/s^2)	Zemin durumu			Zemin durumu		
			Yumuşak	Orta	Sert	Yumuşak	Orta	Sert
1	1,974	-3,713	6,823	4,093	3,605	15,325	7,868	6,744
2	-4,318	-3,719	7,605	5,550	5,365	12,138	6,334	5,287
3	6,121	-3,771	7,558	5,342	5,496	8,913	4,779	4,017
4	7,461	-3,670	7,044	5,384	5,260	6,121	4,256	4,352
5	8,478	-3,638	6,311	5,691	5,813	4,165	4,236	4,308
6	9,786	-3,812	6,930	6,505	6,487	4,414	4,215	4,218
7	10,934	-3,920	7,954	7,142	7,174	5,043	4,389	4,456
8	11,694	-4,091	9,719	9,342	9,294	5,399	4,903	4,838

Tablo 3.9. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren düzlem çerçevenin analizleri sonuçlarından elde edilen maksimum kat yatay yerdeğıştirmeleri

Kat No	Zemin-yapı etkileşimi içermeyen durum		İzolasyonsuz (mm)			ÜESS (mm)		
	İzolasyonsuz (mm)	ÜESS (mm)	Zemin durumu			Zemin durumu		
			Yumuşak	Orta	Sert	Yumuşak	Orta	Sert
1	13,00	5,3	27,40	26,48	26,32	12,33	11,00	9,54
2	36,3	14,1	45,93	44,64	44,38	26,53	23,48	21,93
3	63,9	23,3	62,64	60,95	60,59	40,43	35,88	34,17
4	91,3	31,1	77,46	75,16	74,70	52,68	47,02	45,17
5	117,0	37,5	90,61	87,37	86,77	63,33	56,38	54,37
6	146,5	43,8	104,40	100,00	99,27	74,33	65,78	63,37
7	167,8	48,0	114,50	108,70	111,20	82,43	72,48	70,07
8	179,4	50,4	120,94	114,60	119,49	88,31	76,62	74,06

Düzlem çerçevenin kat yatay yerdeğıştirmeleri Tablo 3.9'da gösterilmiştir. ÜESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin her bir katındaki göreceli yerdeğıştirmeler izolasyonsuz duruma göre daha küçük olduğu görülmektedir.

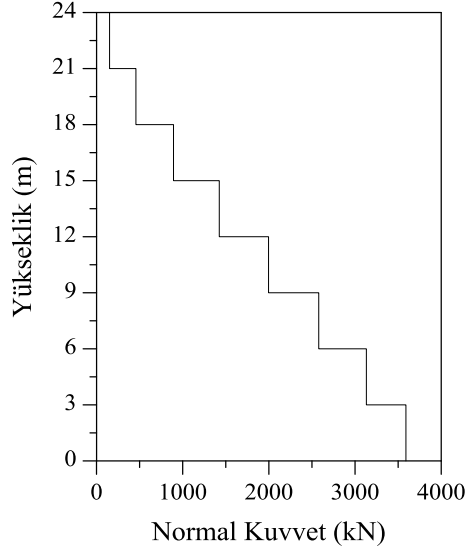
İzolasyonsuz düzlem çerçevenin maksimum kat yerdeğiştirmeleri birinci kattan son kata doğru değişerek artmaktadır. Sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin maksimum göreceli kat yerdeğiştirmeleri izolasyonsuz düzlem çerçeveye oranla daha küçüktür. Buradan düzlem çerçevenin deprem sırasında bir bütün olarak hareket ettiği kabulü yapılabilmektedir.

Zemin-yapı etkileşimi içeren izolasyonsuz düzlem çerçevede göreceli kat yerdeğiştirmeleri zemin-yapı etkileşimi içermeyen izolasyonsuz düzlem çerçeveye oranla daha büyüktür. Bu durum izolasyonsuz düzlem çerçevede zemin-yapı etkileşiminin hesaba katılmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

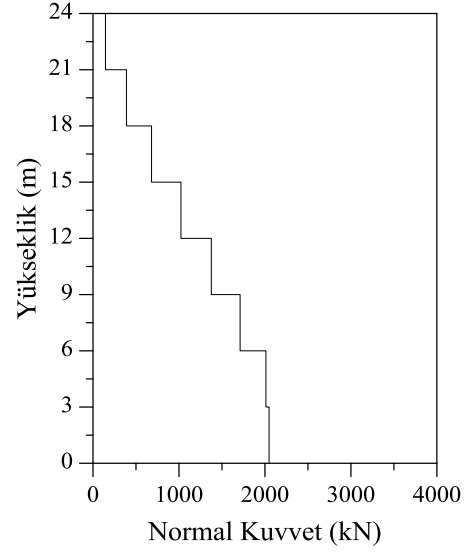
Şekil 3.55'ten görüldüğü gibi zemin-yapı etkileşimi içermeyen durumda izolasyonlu düzlem çerçevenin maksimum yerdeğiştirmesi 410,80 mm'dir. Zemin-yapı etkileşimi içeren analiz sonuçlarından elde edilen izolasyonsuz durumdaki maksimum yerdeğiştirme yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için sırasıyla 399,47 mm, 400,62 mm ve 401,93 mm'dir. Bunun sonucu olarak, Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınması ÜESS mesnetinin yerdeğiştirmesini etkilemediğini göstermektedir. Düzlem çerçeve farklı rijitliklere sahip zemin sınıfları üzerinde modellenirse de ÜESS mesnet sisteminin yerdeğiştirme kapasitesi değişmemektedir.

3.3.3. Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

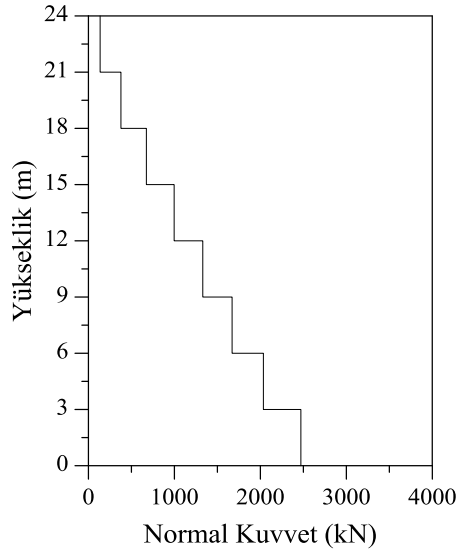
17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin GBZ000 yatay bileşeni kullanarak her bir kattaki kolonlarda meydana gelen normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ile taban kesme kuvvetleri hesaplanarak karşılaştırılması Şekil 3.56–3.63'te gösterilmiştir.



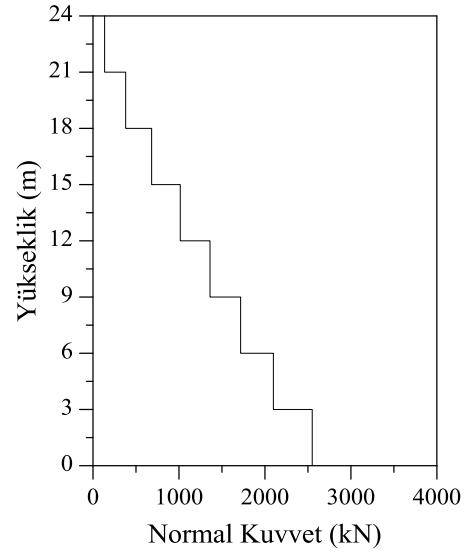
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

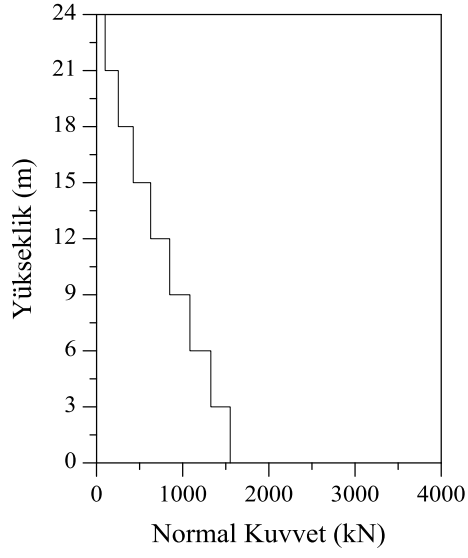


c) Orta zemin

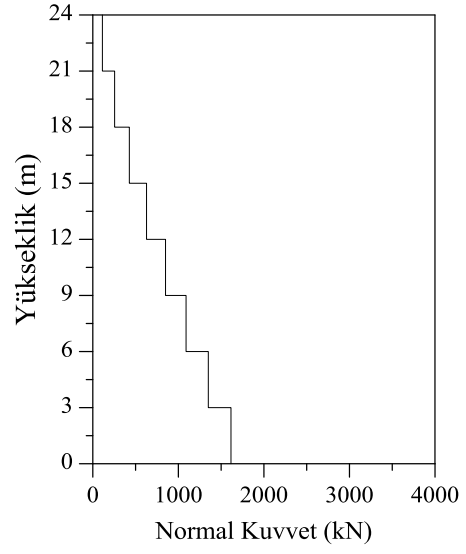


d) Sert zemin

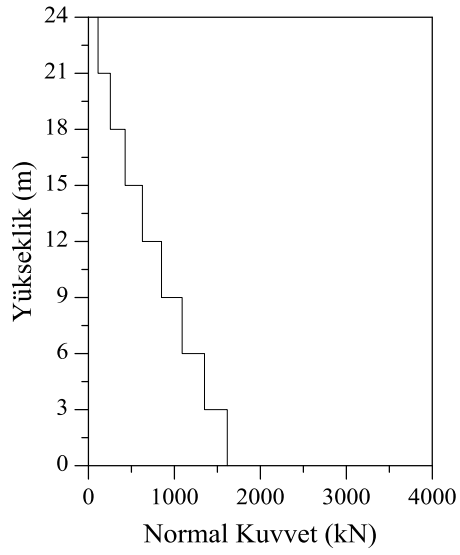
Şekil 3.56. Zemin yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki normal kuvvetlerinin karşılaştırılması



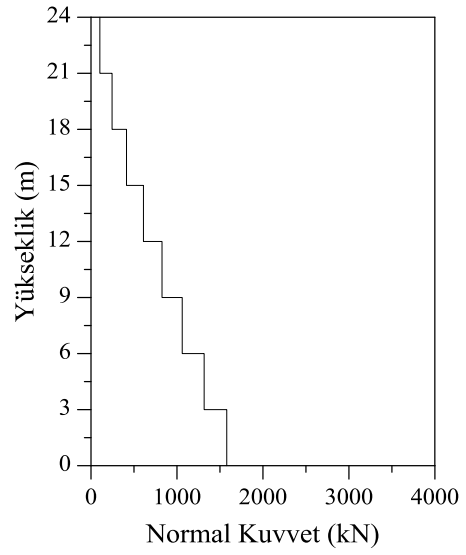
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

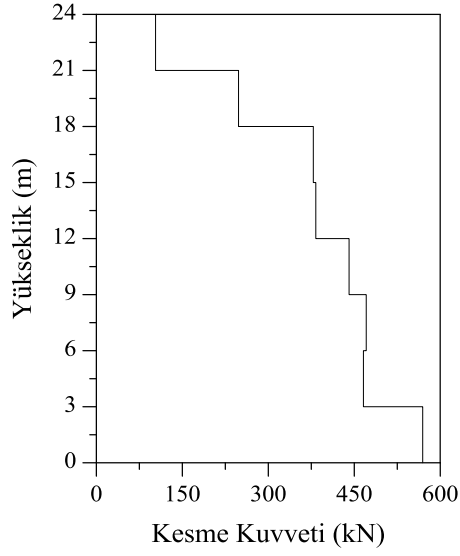


c) Orta zemin

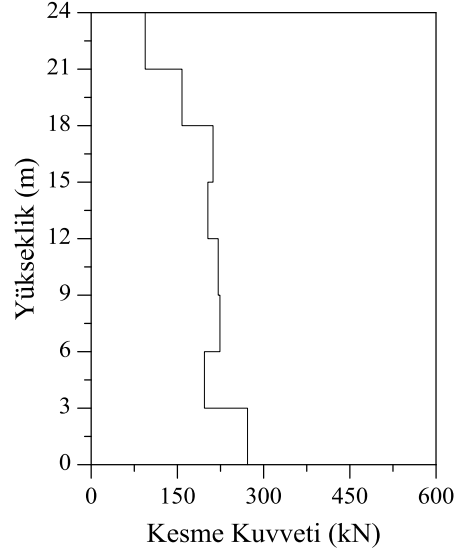


d) Sert zemin

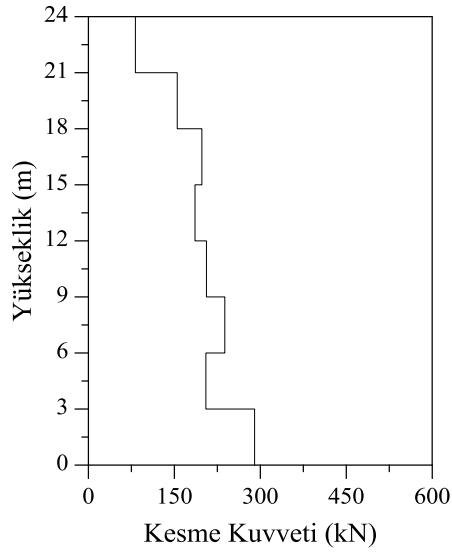
Şekil 3.57. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki normal kuvvetlerinin karşılaştırılması



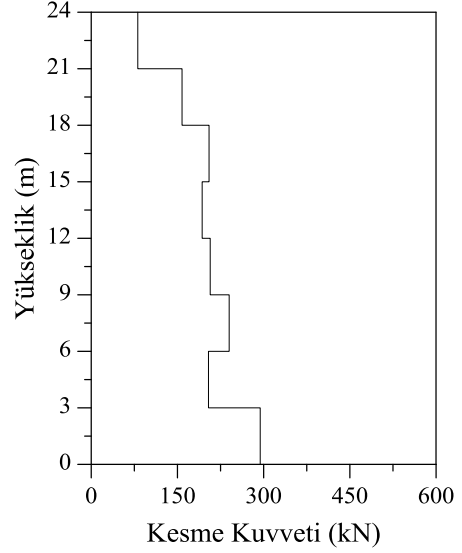
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

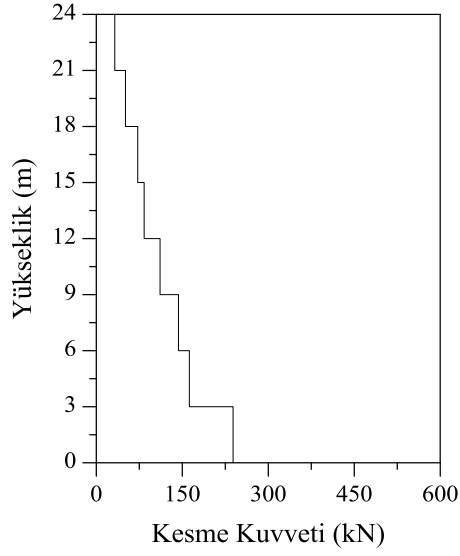


c) Orta zemin

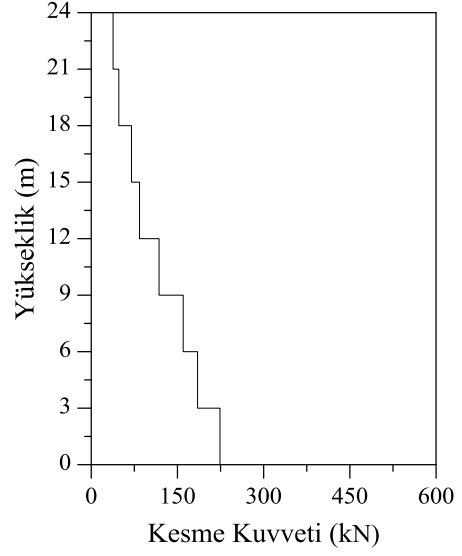


d) Sert zemin

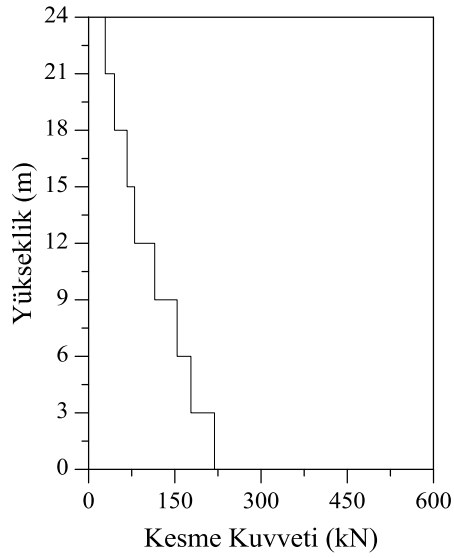
Şekil 3.58. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



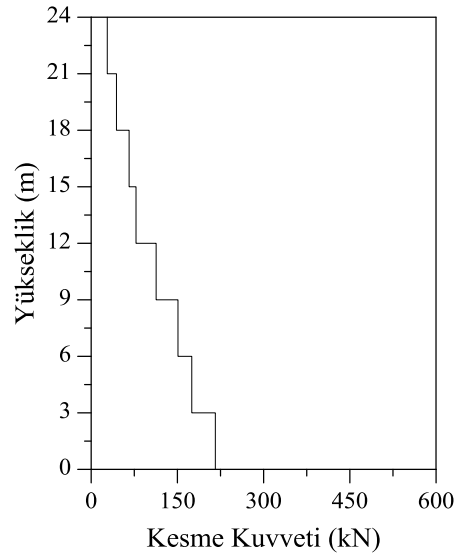
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

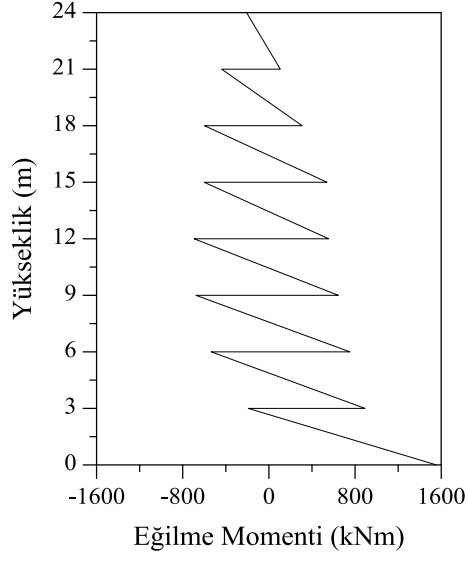


c) Orta zemin

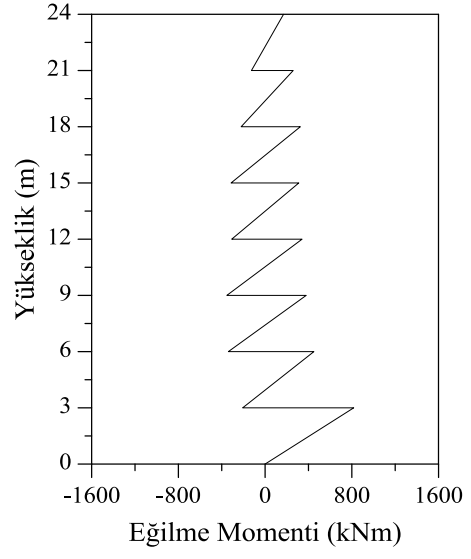


d) Sert zemin

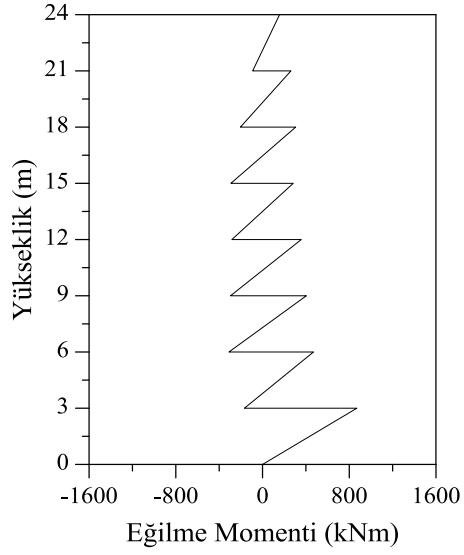
Şekil 3.59. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



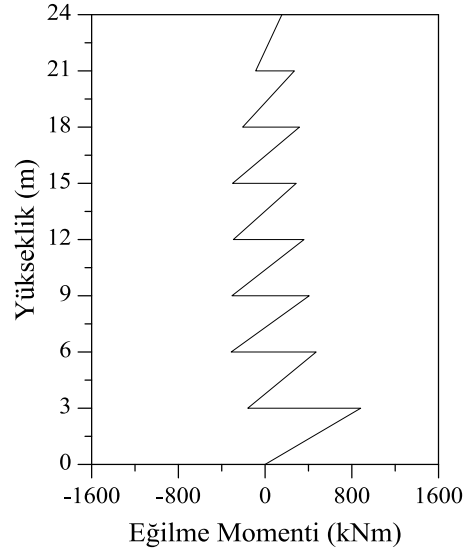
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

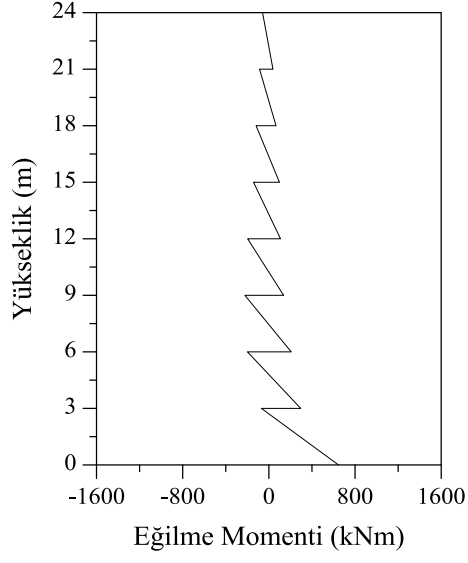


c) Orta zemin

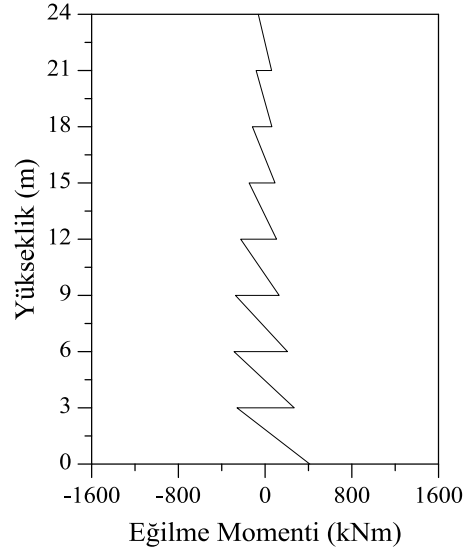


d) Sert zemin

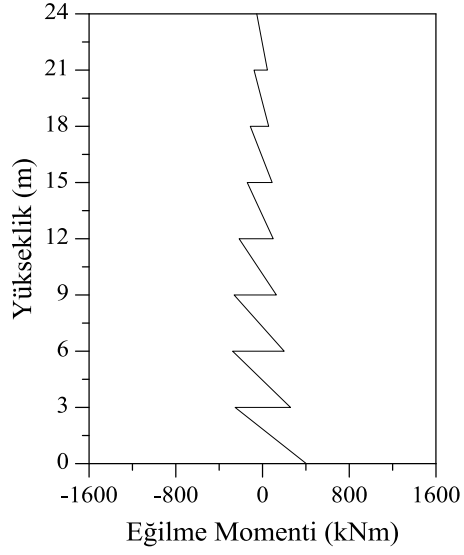
Şekil 3.60. Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki eğilme momentlerinin karşılaştırılması



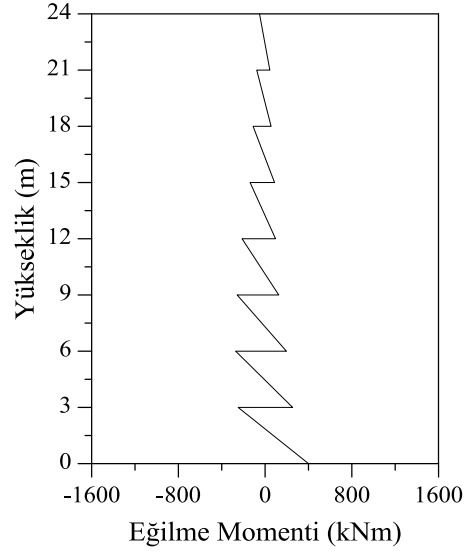
a) Rijit zemin



b) Yumuşak zemin

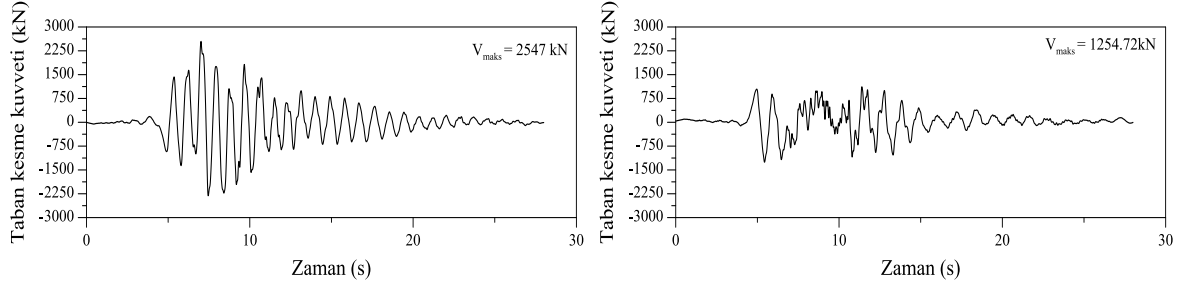


c) Orta zemin



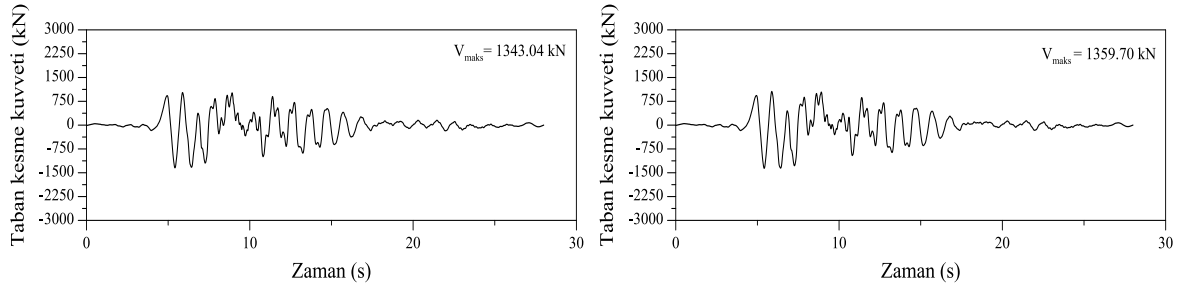
d) Sert zemin

Şekil 3.61. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



a) Rijit zemin

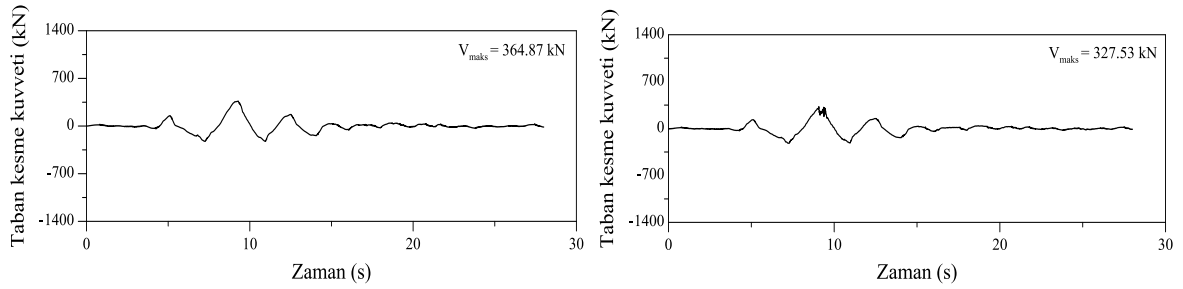
b) Yumuşak zemin



c) Orta zemin

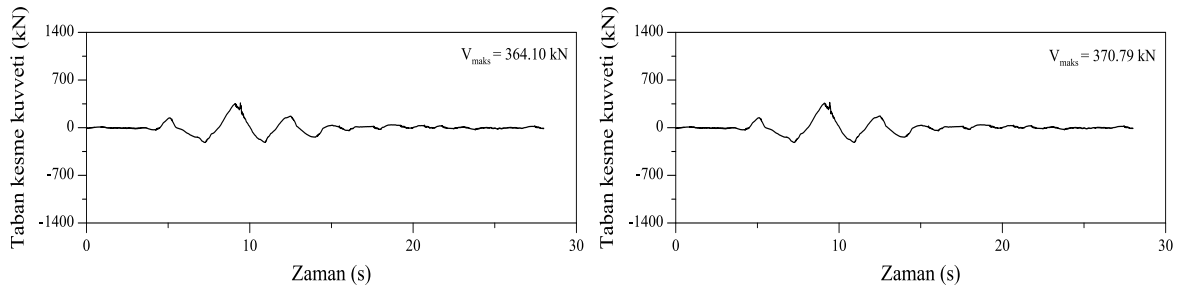
d) Sert zemin

Şekil 3.62. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



a) Rijit zemin

b) Yumuşak zemin



c) Orta zemin

d) Sert zemin

Şekil 3.63. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

3.3.3.1. Kolonlarda Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri, Eğilme Momentleri ve Taban Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının İrdelenmesi

Zemin-yapı etkileşimi içeren ÜESS mesneti kullanılarak sismik izolasyonu yapılan 8 katlı düzlem çerçevenin tepkileri ile düzlem çerçevenin izolasyonsuz modellenerek yapılan dinamik analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.56–3.61, kat kolonlarının alt ve üst seviyelerinde elde edilen maksimum normal kuvvetlerin, kesme kuvvetlerinin, eğilme momentleri ve taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılmasında olanak sağlamaktadır.

ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan ve yapılmayan 8 katlı düzlem çerçevenin üç farklı zemin durumundaki analizlerden elde edilen normal kuvvetlerinde, kesme kuvvetlerinde ve eğilme momentlerinde farklılık gözlenmemiştir. Sismik izolasyonu yapılan 8 katlı düzlem çerçevenin kat seviyelerindeki göreceli yerdeğiştirmelerin sonucu olarak, yukarıdaki şekillerde gösterilen normal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri göz önüne alınırsa kolon ve kiriş elemanlarının atalet kuvvetlerinde azalışlar olacağı söylenebilir. Zemin-yapı etkileşimi içeren veya içermeyen sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin atalet kuvvetleri sismik izolasyonlu düzlem çerçeveninkinden daha büyüktür. Zemin-yapı etkileşimi içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin bütün atalet kuvvetleri azalırken zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin bütün atalet kuvvetleri artar.

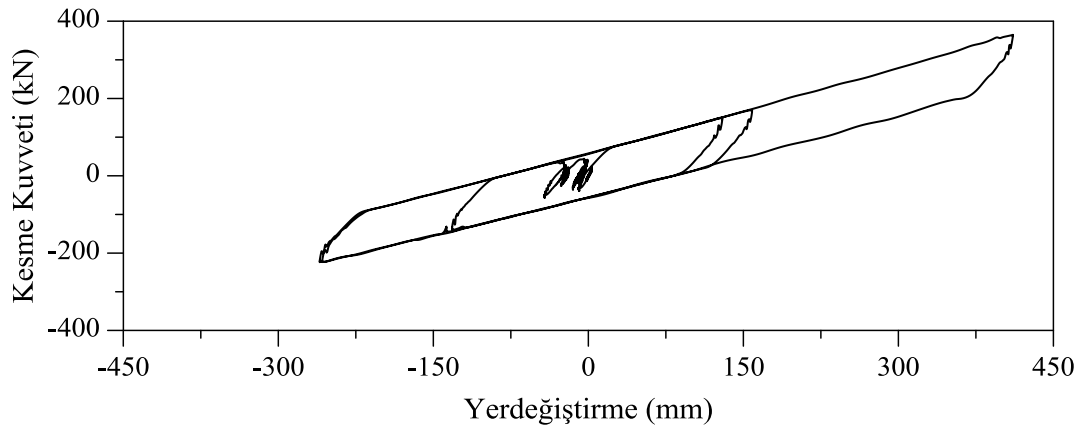
Zemin-yapı etkileşimi içeren sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin ankastre sismik izolasyonsuz duruma oranla kesme kuvvetlerinde ortalama %43 azalma olmuştur. Buna karşın eğilme momentleri ile aksenal kuvvetler zemin-yapı etkileşimi içermeyen duruma kıyasla neredeyse aynıdır.

İzolasyonlu ve izolasyonsuz yumuşak, orta ve sert zemin durumlarındaki taban kesme kuvvetleri her durum için ayrı ayrı hesaplanarak Şekil 3.62 ve 3.63’de gösterilmiştir. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin izolatör seviyesindeki taban kesme kuvvetleri sırasıyla 0,8 W ve 0,56 W dir. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen durumda taban kesme kuvvetleri izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçeve için sırasıyla 364,87 kN ve 2547 kN dur. Zemin-yapı etkileşimi içeren sismik izolasyonsuz düzlem çerçevede yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için taban kesme kuvvetleri sırasıyla 0,276 W, 0,296 W ve 0,299 W, izolasyonlu düzlem çerçevede ise 0,134 W, 0,080 W ve 0,082 W dir. Sismik izolasyonlu

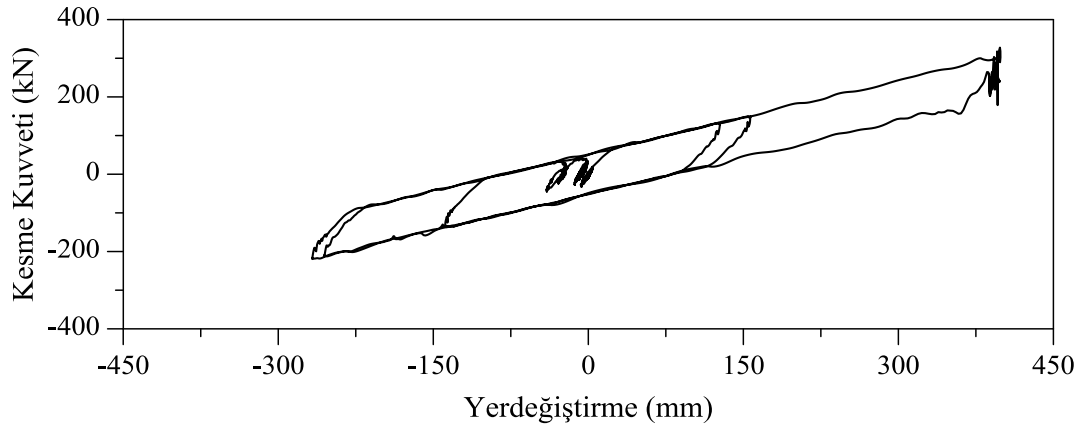
ve izolasyonsuz düzlem çerçevede orta ve sert zemin sınıflarında taban kesme kuvvetleri birbirine yakındır.

3.3.4. İzolatördeki Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi

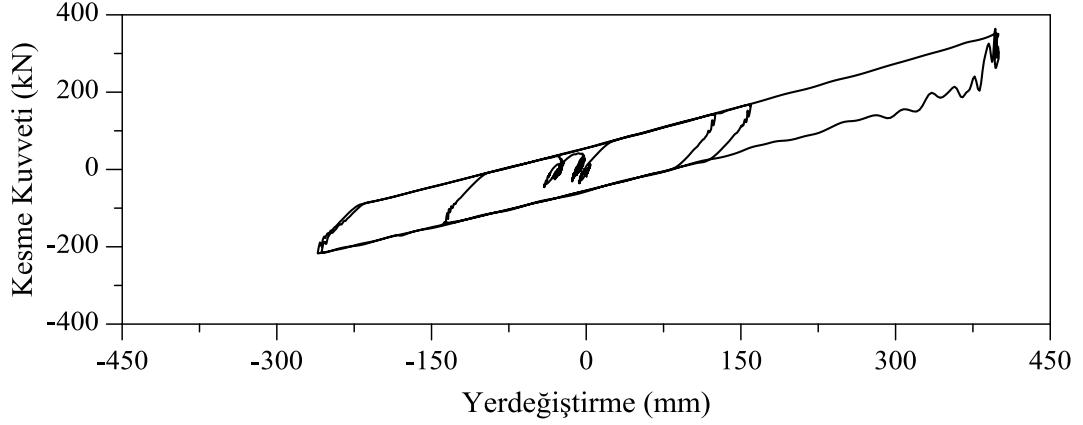
Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen 8 katlı düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnet seviyesindeki kesme kuvveti-yerdeğiştirme arasındaki ilişki üç zemin sınıfı için hesaplanıp Şekil 3.64–3.67’de gösterilmiştir.



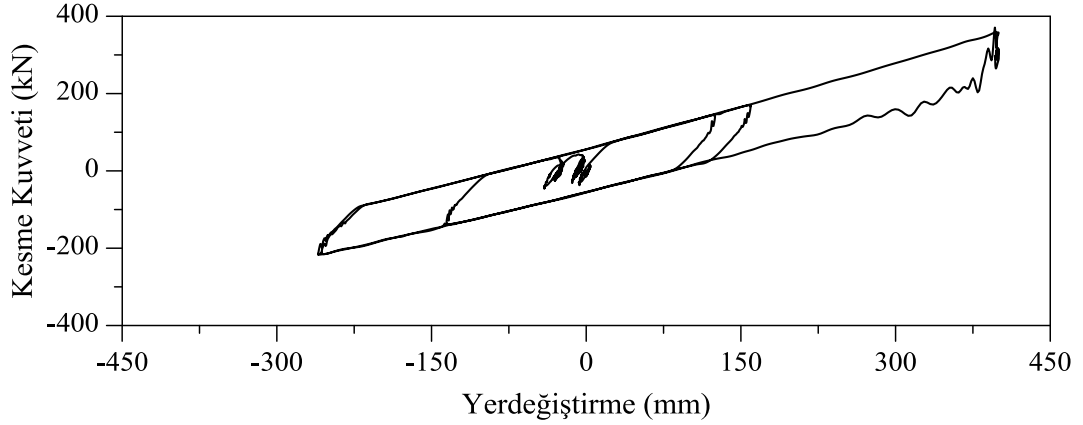
Şekil 3.64. Zemin-yapı etkileşimi içermeyen düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.65. Yumuşak zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.66. Orta zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.67. Sert zemin üzerindeki düzlem çerçevede kullanılan ÜESS mesnedinin kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi

3.3.4.1. Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi Sonuçlarının İrdelenmesi

Düzlem çerçevenin ÜESS mesnet seviyesindeki kesme kuvveti-yerdeğiştirme arasındaki ilişki Şekil 3.62–3.65’de verilmiştir. Çevrim başına harcanan enerji emilimi her bir döngü altındaki alana eşittir. Bu alan sayesinde mesnetin etkili sönümü ortalama olarak hesaplanabilir. Yukarıda adı geçen şekillerde ÜESS mesnetinin enerji emilimi ile ilişkili döngüler altındaki alanlar neredeyse birbirine eşittir. Bu durum, ÜESS mesnetinin zemin-yapı etkileşimi içermeyen ve zemin-yapı etkileşimi içeren farklı zemin sınıflarına göre yapılan analizlerde eşit enerji emdiğini gösterir. Yani farklı rijitlikte zemin kullanımında ÜESS mesnetinin emdiği enerji değişmemektedir.

3.4. Sismik İzolasyonsuz, TESS ve ÜESS Mesneti ile Sismik İzolasyonu Yapılan Gülburnu Köprüsü'nün Analizleri Sonuçlarından Elde Edilen Bulgular

Dinamik dış yük olarak 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının ERZE-EW ve ERZE-NS yatay bileşenleri yer hareketi olarak kullanılmıştır (PEER, 2009). Gülburnu Köprüsü'nde sismik izolasyonsuz, TESS mesneti ve ÜESS mesneti kullanarak üç ayrı dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi boyunca her bir sonlu elemanın düşey yerdeğiştirme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti değerleri karşılatırılmıştır. Kolon ile tabliye arasına yerleştirilen TESS ve ÜESS mesnetlerindeki yerdeğiştirme ve bu mesnetlerde meydana gelen kesme kuvveti-yerdeğiştirme arasındaki ilişki hesaplanarak her iki mesnetteki değerler karşılatırılmıştır.

3.4.1. Analizler Sonuçlarından Elde Edilen Periyotlar

Gülburnu Köprüsü'nde sismik izolasyonsuz, TESS mesneti ve ÜESS mesneti kullanarak yapılan dinamik analizlerden elde edilen periyotlar aşağıdaki Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Gülburnu Köprüsü'nde sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesneti kullanarak yapılan dinamik analizlerden elde edilen periyotlar

Mod No	İzolasyonsuz	TESS	ÜESS
1	1,178	2,012	2,963
2	1,085	1,915	2,962
3	0,980	1,875	2,141
4	0,849	1,778	2,139
5	0,627	1,404	1,411

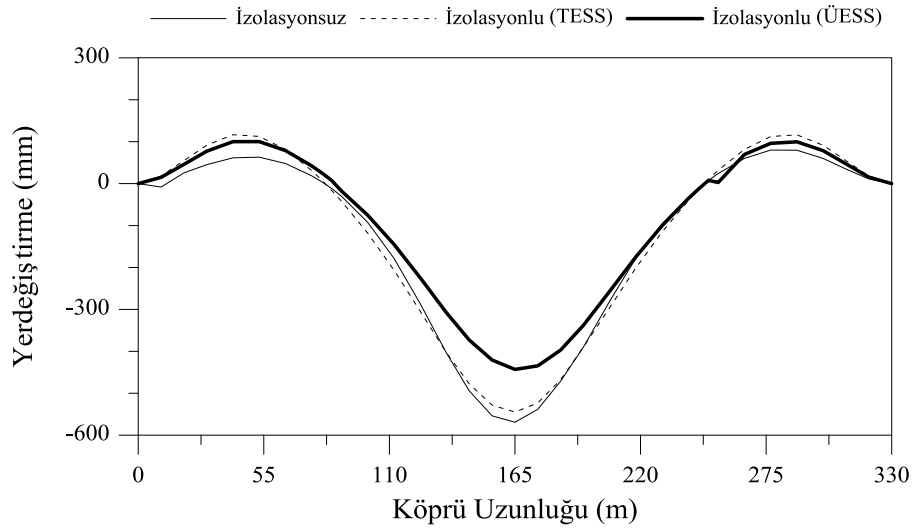
3.4.1.1. Periyotların İrdelenmesi

Sismik izolasyon kullanılmayan, TESS mesneti ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan Gülburnu Köprüsü'nün dinamik analizlerinden elde edilen periyotlar

Şekil 3.10’da verilmiştir. ÜESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan köprünün hakim periyodu TESS mesnet sistemininkine oranla daha büyüktür. Periyodun artmasıyla depremden dolayı köprüye gelen ivmeler azalacaktır ve kesit tesirlerinde azalmalar oluşacaktır. Bunun sonucu olarak köprü daha şiddetli depremlere dayanıklı olacaktır.

3.4.2. Analizler Sonuçlarından Elde Edilen Düşey Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Sismik izolasyon yapılmamış, TESS mesneti ve ÜESS mesneti ile izolasyonu yapılan köprünün tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Her üç durumdaki düşey yerdeğiştirmelerin karşılaştırılmaları Şekil 3.68’de gösterilmiştir. Dinamik analizler zaman tanım alanında analiz yöntemine göre yapılmıştır.



Şekil 3.68. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesneti kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi düşey yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması

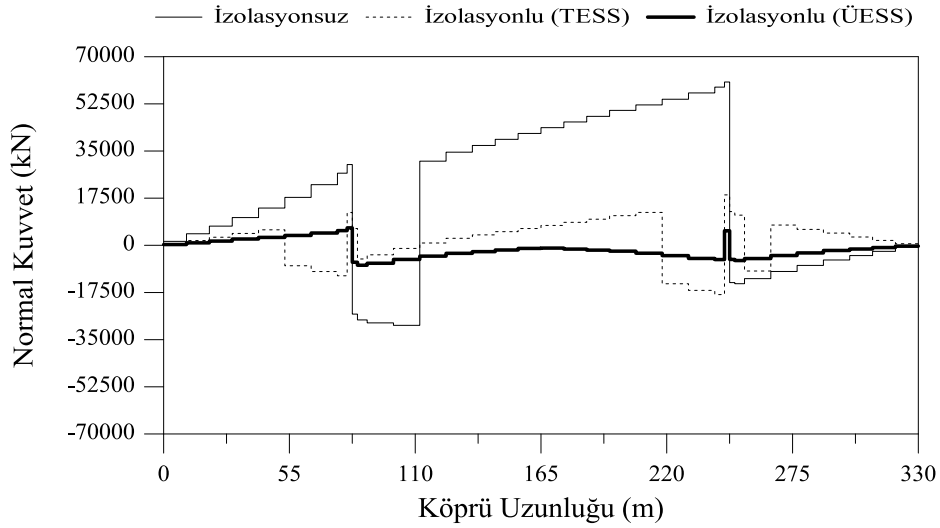
3.4.2.1. Analizler Sonuçlarından Elde Edilen Düşey Yerdeğiştirmelerin İrdelenmesi

ÜESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan köprünün düşey yerdeğiştirmeleri diğer durumlara kıyasla daha küçüktür. TESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan köprünün düşey yerdeğiştirmeleri ise sismik izolasyonsuz duruma göre daha küçüktür.

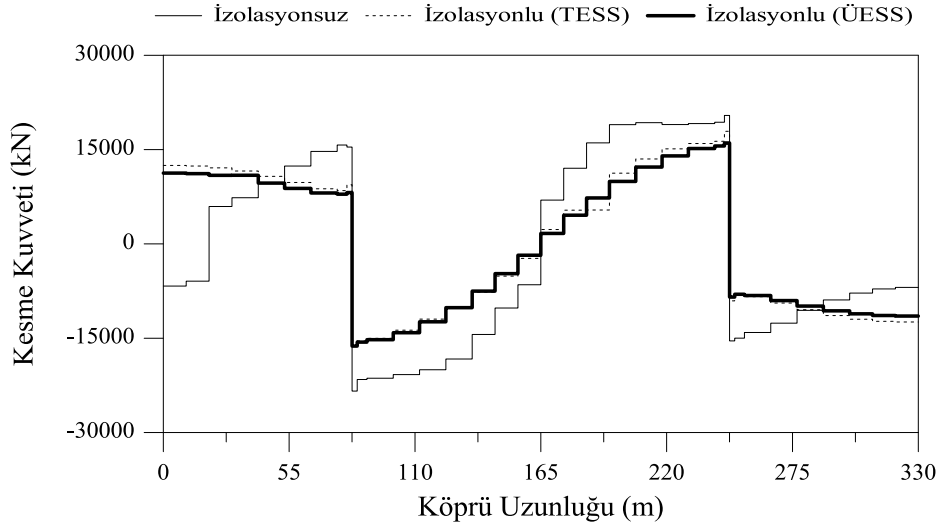
Geometriden dolayı etkili yarıçapın büyüklüğü düşey yerdeğiştirme ile doğru orantılıdır. Bunun ışığında, ÜESS mesnetinin etkili yarıçapı TESS mesnetinden daha küçük olmasına rağmen analizinden elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durum, ÜESS mesnet sisteminin düşey yerdeğiştirme açısından etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır.

3.4.3. Tabliye Boyunca Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri ve Burulma Momentlerinin Karşılaştırılması

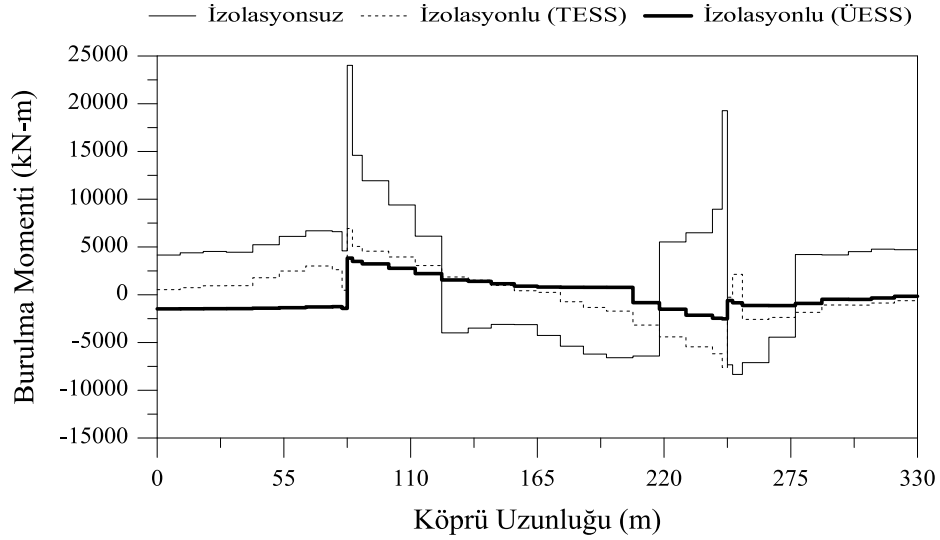
13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının ERZ-EW ve ERZ-NS yatay bileşenleri yer hareketleri kullanılarak tabliye boyunca düğüm noktalarında meydana gelen normal kuvvet, kesme kuvveti ve burulma momentleri hesaplanmıştır. Sismik izolasyonsuz, ÜESS mesneti ve TESS mesneti kullanarak sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin analizden elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması aşağıdaki Şekil 3.69–3.71’de gösterilmiştir.



Şekil 3.69. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi normal kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.70. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.71. Gülburnu köprüsünün sismik izolasyonsuz, TESS ve ÜESS mesnetleri kullanarak yapılan analizleri sonuçlarından elde edilen köprü tabliyesi burulma momentlerinin karşılaştırılması

3.4.3.1. Tabliye Boyunca Meydana Gelen Normal Kuvvetler, Kesme Kuvvetleri ve Eğilme Momentleri Sonuçlarının İrdelenmesi

Yapılan analiz sonuçlarında, sismik izolasyon yapılmayan köprünün normal kuvvetleri sismik izolasyon yapılan köprülere oranla fark edilebilir derecede büyük olduğu açıkça görülmektedir. ÜESS mesnet sistemindeki kesme kuvvetleri TESS mesnet

sistemindeki değerlere yakın olmasına rağmen daha küçüktür. Bunun sonucu olarak oluşacak kesit tesirleri daha küçük olacaktır. Dolayısıyla daha küçük kesit boyutlarıyla inşa edilerek ekonomiklik sağlanacaktır. Sismik izolasyonsuz köprünün analizi sonucundan elde edilen burulma momentleri sismik izolasyon yapılan durumlara oranla oldukça fazladır. Sismik izolasyonlu durumlarda ise ÜESS mesnetinin burulma momenti TESS mesnet sistemininkine oranla daha küçüktür.

Buradan, ÜESS mesneti ile sismik izolasyonu yapılan Gülburnu Köprüsü'nün, mevcut TESS mesneti kullanarak sismik izolasyonu yapılmış duruma oranla daha küçük kesit tesirlerine sahip olduğu görülmektedir. ÜESS mesnet ebatlarının TESS mesnetine oranla daha küçük olduğu da göz önünde bulundurulursa Gülburnu Köprüsü'nün sismik izolasyonunda daha küçük kesit tesirleri elde edilen ÜESS mesnetinin kullanımı daha ekonomik bir çözüm olacaktır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetli yapıların dinamik davranışına zemin eğilebilirliğinin etkisi ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, yapı ile oturduğu zemini birbirinden ayırıp zeminden gelebilecek etkilerden yapının en az biçimde etkilenmesini sağlamaktır. Bu amaçla yapı ile oturduğu zemin arasına sismik izolasyon sistemlerinden biri olan üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnedi yerleştirilmiştir.

Yapılan çalışmanın ilk kısmında, ÜESS mesneti ile sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak modellenen 8 katlı düzlem çerçevenin analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen düzlem çerçeve sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak modellenip yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dinamik analizlerde zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Gebze İstasyonu kaydının GBZ000 bileşeni kullanılmıştır. Söz konusu yer hareketi yapıya yatay yönde uygulanmıştır.

Yapılan çalışmanın diğer kısmında ise, ÜESS mesnedi; 'Doğu Karadeniz Sahil Yolu İyileştirme Projesi kapsamındaki Trabzon-Giresun Devlet Yolu'nun 20+362 ve 20+692 km'leri arasında TESS mesnedi ile tasarlanan Gülburnu Köprüsü'nde kullanılmıştır. Köprü'nün sismik izolasyonsuz, mevcut TESS mesnetli ve ÜESS mesnetli durumları karşılaştırılmıştır. Yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının ERZ-EW ve ERZ-NS bileşenleri kullanılmıştır. ERZ-NS bileşeni köprü tabliyesi boyunca ve ERZ-EW bileşeni tabliyeye dik yönde uygulanmıştır.

Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara ve önerilere ulaşılmıştır:

1. ÜESS mesnedi kullanılarak yapıların hakim periyodu uzatılabilmekte ve buna bağlı olarak da deprem dayanımları artırılabilir.
2. Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen ÜESS mesneti kullanılarak sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevedeki kat yerdeğiştirmeleri, izolasyonsuz düzlem çerçeveye oranla oldukça azdır. Bunun sonucu olarak sismik izolasyon kullanılan binada kesit tesirleri azalacaktır. Dolayısıyla kesit tesirleri azaldığından bina boyutlandırılmasında kesitler daha küçük çıkmaktadır. Ayrıca buradan sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin deprem sırasında bir bütün olarak hareket ettiği kabulü yapılabilir.

3. İzolasyonsuz düzlem çerçevede ivmeler birinci kattan itibaren üst katlara doğru artmakta olup, yer hareketinin maksimum ivmesinden daha büyük çıkmıştır. Buna karşılık ÜESS mesnetli düzlem çerçevede kat ivmeleri yer hareketinden küçük çıkmıştır. Yapı bir bütün olarak hareket ettiğinden dolayı kat ivmelerinde ilk kattan üst katlara doğru gittikçe fazla bir artış olmadığı görülmüştür.
4. ÜESS mesnedi kullanılan düzlem çerçevenin taban kesme kuvveti izolasyonsuz duruma oranla %57 azalmaktadır.
5. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında izolasyonlu durumdaki taban kesme kuvveti izolasyonsuz duruma oranla %30 azalmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi içeren izolasyonsuz düzlem çerçevede yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için taban kesme kuvvetleri sırasıyla 0,276 W, 0,296 W ve 0,299 W, izolasyonlu düzlem çerçevede ise 0,134 W, 0,080 W ve 0,082 W dir. İzolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevede orta ve sert zemin sınıflarında taban kesme kuvvetleri birbirine yakındır.
6. ÜESS mesnetinin yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin azaltılması ile taban kesme kuvvetleri azalırken buna karşılık mesnedin yerdeğiştirmesi artmaktadır.
7. ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevenin periyodu artırıldığında taban kesme kuvvetleri azalır. Buna karşılık yerdeğiştirmeler artmaktadır.
8. Zemin-yapı etkileşimi içeren ve içermeyen ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonu yapılan düzlem çerçevedeki normal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri izolasyonsuz olarak modellenen duruma kıyasla daha küçüktür.
9. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınan sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmayan durumdaki periyotlarından daha büyük olup, depreme dayanıklılığı daha yüksektir.
10. Zemin-yapı etkileşimi içeren izolasyonsuz düzlem çerçevenin bütün atalet kuvvetleri azalırken, zemin-yapı etkileşimi içermeyen izolasyonsuz düzlem çerçevenin bütün atalet kuvvetleri artar. İzolasyonsuz durumda atalet kuvvetleri daha küçük olduğu için zemin-yapı etkileşimini dikkate almak gerekir.
11. Yumuşak, orta ve sert zemin üzerine modellenen sismik izolasyonlu düzlem çerçeve zemin rijitliğinin değişiminden etkilenmediği için hakim periyotları neredeyse birbirine yakındır.
12. Sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotları, zeminin rijitliği arttırıkça küçülmektedir. Yani çok sert zemin üzerine modellenecek sismik izolasyonsuz

düzlem çerçevenin periyotları, zemin-yapı etkileşimi içermeyen sismik izolasyonsuz düzlem çerçevenin periyotlarına oldukça yakındır.

13. ÜESS mesnedi ile yumuşak zemin üzerine modellenen düzlem çerçevedeki ivmeler diğer zemin durumlarına oranla çok daha büyüktür. Bundan dolayı yumuşak zemin üzerinde ÜESS mesnedi kullanarak sismik izolasyon yapılması önerilmez.
14. ÜESS mesnet sisteminin yerdeğiştirme kapasitesi zemin rijitliğinin değişiminden etkilenmez.
15. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz durumlarda farklı zemin rijitlikleri kullanımı kolon normal kuvvetlerinde, kesme kuvvetlerinde ve eğilme momentlerini farklılık göstermemektedir.
16. Farklı zemin rijitlikleri kullanımı izolatöre gelen kesme kuvveti-yerdeğiştirme arasındaki ilişkiyi etkilemediği tespit edilmiştir.
17. Gülburnu analizleri sonucunda, ÜESS mesnedi kullanımı ile köprü periyodu, TESS mesneti kullanımına kıyasla daha fazla uzatılabilmektedir.
18. Sismik izolasyon yapılmayan köprünün normal kuvvetleri, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri sismik izolasyon yapılan köprüye kıyasla oldukça fazladır. Sismik izolasyon kullanımıyla köprüde oluşacak kesit tesirleri daha küçük olacaktır. Dolayısıyla köprü daha küçük boyutlarla inşa edilerek ekonomiklik sağlanmış olacaktır.
19. ÜESS mesnedi kullanımıyla elde edilen düşey yerdeğitirmeler, normal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve burulma momenti TESS mesnedinden elde edilenlere oranla daha küçüktür.
20. ÜESS mesnet kullanımında elde edilen kesit tesirleri, TESS mesnet kullanımından elde edilen kesit tesirlerinden daha küçüktür. Bu yüzden ÜESS mesneti kullanımı daha ekonomik olabilir.
21. Analizlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, ÜESS mesnet sistemi çok güçlü depremlerde daha faydalı olabilecektir.

5. KAYNAKLAR

- Akköse, M., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 2008. Reservoir Water Level Effects On Onlinear Dynamic Response of Arch Dams. Journal of Fluids and Structures, 24, 418–435.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2010. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, Journal of Bridge Engineering, doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000150.
- Almazan, J.L., Llera, J.C.D.L. ve Inaudi, J.A., 1998. Modelling Aspects of Structures Isolated With The Frictional Pendulum System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 27,8, 845–867.
- Ateş, Ş. ve Dumanoglu, A.A., 2003. Taban İzolasyonlu Binaların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi, 13. Ulusal Mekanik Kongresi, Eylül, Gaziantep, Bildiriler Kitabı: 165-174.
- Ateş, Ş., 2004. Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Sürtülmeli Sarkaç Mesnet Modeli ile Taban İzolasyonu Yapılan Köprülerin Deprem Davranışının Belirlenmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi, Bildiriler Metni (CD), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ateş, Ş. ve Dumanoglu, A.A., 2003. Kauçuk Mesnetli Binaların Dinamik Analizi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs, İstanbul, Bildiri No: AT-048.
- Ayhan, O., 2006. Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Klasik Yöntem ile Sürtülmeli Sarkaç Sistemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Akköse, M., 2005. Influence of base-rock characteristics on the stochastic dynamic response of dam–reservoir–foundation systems, Engineering Structures, 27, 1498-1508.
- Ceccoli, C., Mazzotti C. ve Savoia, M., 1999. Non-Linear Seismic of Base Isolated RC Frame Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 28, 633-653.
- Computers and Structures Inc. 2007. SAP2000: Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Berkeley, CA, U.S.A.
- Constantinou, M.C., Tsopeles, P., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1994. Taisei Corporation Reserch Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of Friction Pendulum System, Technical Report MCEER-93, State University of Newyork at Buffalo.
- Constantinou, M.C. ve Tadjbakhsh, I.G., 1985. Hysteretic Dampers in Base Isolation: Random Approach, Jornel of Structural Engineering, 111, 705-721.

- Constantinou, M.C. ve Kneifati M.C., 1988. Dynamic of Soil-Base-Isolated-Structure Systems, Journal of Structural Engineering, ASCE, 114, 211-221
- Constantinou, M., Mokha, A. ve Reinhorn, A., 1990. Teflon Bearing in Base Isolation II: Modeling, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 455-474.
- Constantinou, M.C., Tsopelas, P.C., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1993. Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges : Experimental and analytical study of a friction pendulum system, New York; U.S. National Center for Earthquake Engineering Research; Technical Report NCEER, 93-0020.
- Deb, S. K., 2004. Seismic Base Isolation–An Overview, Geotechnics And Earthquake Hazards, 87,10, 1426-1430.
- Dicleli M., Albhaisi S. ve Mansour M.Y., 2005. Static Soil–Structure Interaction Effects in Seismic-Isolated Bridges, Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, 10, 1, 22-33.
- Erdik, M., 2007. Binalarda Deprem Yalıtımı ve Ülkemizdeki Uygulamalar, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 181-205.
- Fadi, F. ve Constantinou, M.C., 2009. Evaluation of Simplified Methods of Analysis for Structures With Triple Friction Pendulum Isolators, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 39, 5-22.
- Fan, F.G. ve Ahmadi, G., 1990. Floor Response Spectra For Base-Isolated Multi-Storey Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 19, 3, 377-388.
- Faramarz, K. ve Montazar, R., 2009. Seismic Response of Double Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures Considering Vertical Component of Earthquake, Advances in structural engineering, 13, 1, 1-14.
- Fenz, D.M., 2008. Development, Implementation Verification of Dynamic Analysis Models of Multi-Spherical Sliding Bearings, Doktora Tezi, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering State University of New York at Buffalo,
- Fenz, D.M. ve Constantinou, M.C., 2006. Behaviour of Double Friction Pendulum Bearing, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 35, 1403-1424.
- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2008a. Spherical Sliding Isolation Bearings With Adaptive Behavior: Theory, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 37, 163–183.
- Fenz, D.M. ve Constantinou, M.C., 2008b. Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response History Analysis, Earthquake Spectra, 24, 4, 1011–1028.

- Hamidi, M. El Naggar, M. H. ve Vafai, A., 2003. Response of Structures Supported on SCF Isolation Systems, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 32, 1555-1584.
- Hyakuda T, Saito K, Matsushita T, Tanaka N, Yoneki S, Yasuda M, vd., 2001. The structural design and earthquake observation of a seismic isolation bearing using friction pendulum system. In: Proceeding, 7th international seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibration of structure, October, Italy.
- Ibrahimbegavich, A. ve Wilson, E.L., 1989. Simple Numerical Algorithms for The Mode Superposition Analysis of Linear Structural System With Non-Proportional Damping, Computer and Structures, 33, 2, 523-531.
- Jangid, R.S., 1997. Response of Pure-Friction Sliding Structures to Bi-Directional Harmonic Ground Motion, Engineering Structures, 19, 2, 97-104.
- Jangid, R.S. ve Datta, T.K., 1995. Seismic Behaviour of Base-Isolated Buildings: A State of Art Review, Proc. Instn Civ. Engrs Structstand Bldgs, 110, 186-203.
- Kelly, J.M., 1999. The Role of Damping In Seismic Isolation, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 28, 3-20.
- Kim, S.K. ve Yun, C.B., 2007. Seismic Response Characteristics of Bridges Using Double Concave Friction Pendulum Bearings With Tri-Linear Behavior, Engineering Structures, 29, 11, 3082-3093.
- Leger, P. and Boughoufalah, M., 1989. Earthquake Input Mechanisms For Time-Domain Analysis Of Dam-Foundation Systems, Engineering Structures, 11, 1, 37-46.
- Malekzadeh, M. ve Taghikhany, T., 2010. Adaptive Behavior of Double Concave Friction Pendulum Bearing and Its Advantages Over Friction Pendulum Systems, Transaction A: Civil Engineering, 17, 2, 81-88.
- Mokha, A.S., Amin, N., Constantinou, M.C. ve Zayas, V., 1996. Seismic Isolation Retrofit Of Large Historic Building, Journel Structural Engineering, 122, 3, 298-308.
- Mostaghel, N. ve Tanbakuchi, J., 1983. Response of Sliding Structures to Earthquake Support Motion, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 11, 6, 729-748.
- Mostaghel, N. ve Khodaverdian, M., 1987. Seismic Response Structures Suppoerted on RFBI System, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 15, 3, 379-390.
- Murnal, P. ve Sinha, R., 2004. Aseismic Design of Structure–Equipment Systems Using Variable Frequency Pendulum Isolator, Nuclear Engineering and Design, 231, 129-139.

- Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. ve Constantinou, M.C., 1991. Nonlinear Dynamic Analysis Of 3-D Base-Isolated Structures, Journal of Structural Engineering, 117, 7, 2035-2054.
- PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>, 10 Ağustos 2010.
- Pekgökgöz, R.K., Gürel, M.A., Kömür, M. ve Çılı, F., 2007. Cost Analysis of a Building With Seismic Base Isolation System, Journal of Engineering and Natural Sciences, 25, 3, 236-246.
- Purnachandra, S., Jangid, R.S., 2008. Comparative Performance of Isolation Systems for Benchmark Cable-stayed Bridge, International Journal of Applied Science and Engineering, 6, 2, 111-139.
- Roussis, P.C.ve Constantinou, M.C., 2006. Uplift-Restraining Friction Pendulum Seismic Isolation System, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 35, 577–593.
- Satish, N., Andrei M.R. ve Constantinou, M.C., 1994. The Earthquake Engineering Online Archive, 3D-BASIS: Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Structures. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Software/3DBASISZIP>, 8 December 2010.
- Skinner, R.I., Kelly, J.M. ve Heine, A.J., 1975. Hysteretic Dampers for Eartquake Resistance Structers, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 3, 287-296.
- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2008. Effectiveness Of Seismic Isolation For Cable-Stayed Bridges, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 6, 1, 77-96.
- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2007. Passive Hybric Systems For Eartquake Protection Of Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 29, 57-70.
- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2008. Influence of Soil-Structure Interaction on the response of Seismically Isolated Cable-Stayed Bridge, Soil Dynamic and Eartquake Engineering, 28, 245-257.
- Soneji B.B. ve 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. ve Vlassis, A.G., 2002. Effect of Soil–Structure Interaction on Isolated Bridges, Journal of Earthquake Engineering, 6, 3, 391–429.
- Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A. ve Koutromanos, 2009a. Soil–Structure Interaction Effects on Base-Isolated Buildings Founded on Soil Stratum, Soil Dynamics and Eartquake Engineering, 29, 4, 658-668.

- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1989a. Performance of Sliding Resilient-Friction Base Isolation System, Journal of Structural Engineering, 117, 165-181.
- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1989b. A Comparative Study of Performances of Various Base Isolation Systems, Part I: Shear Beam Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 18, 1, 11-32.
- Şengel, H.S., Erol, H. ve Yavuz E., 2009. Sismik İzolasyon Tekniği ve Kullanılışına İlişkin Örnek Uygulama, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 12, 2, 165-178.
- Şimşek, E., 2010. Kabuk Elemanlar Kullanarak Modellenen Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Tongaonkar N. P. ve Jangid R. S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges With Soil-Structure Interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 287-302.
- Tracis, A.C. 1984. The Implementation of Base Isolation for Foothill Communities Law and Justice Center, Report NSF and Country of San Bernardino, San Fransisco.
- Tsai, C.S., 1997. Finite Element Formulations for Friction Pendulum Isolation Bearings, International Journal for Numerical Method in Engineering, 40, 29-49.
- Tsai, C.S, Chiang, T.C. ve Chen, B.J., 2003. Finite Element Formulations and Theoretical Study for Variable Curvature Friction Pendulum System, Engineering Structures, 25, 1719-1730.
- Tsai, C.S., Chen, C.S. ve Chen, B.J., 2004a. Effects of Unbounded Media on Seismic Responses of FPS-Isolated Structures, Structural Control And Health Monitoring, 11, 1, 1-20.
- Tsai, C.S., Chiang, T.C. ve Chen, B.C., 2004b. Experimental Study for Multiple Friction Pendulum System, 13th World Conference on Earthquake Engineering, August, Kanada, 669-680.
- Tsai, C.S., Chiang, T.C. ve Chen, B.C., 2005. Experimental Evaluation of Piecewise Exact Solution for Predicting Seismic Responses of Spherical Sliding Type Isolated Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 34, 1027-1046.
- Tsai, C.S., Lin, Y.C. ve Chen, W.C., 2006. Seismic Behavior of High-Tech Facility Isolated With a Trench Friction Pendulum System, ASME Conference Proceedings, July 23-27, 2006, 175-179
- Tsai, C.S., ve Lin, Y. C., 2009. Mechanical Characteristic and Modeling of Multiple Trench Friction Pendulum System with Multi-Intermediate Sliding Plates, International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering 1, 1, 39-56.

- Tsopelas, P.C., Nagarajah, S., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1994. Nonlinear Dynamic Analysis Of Multiple Building Base Isolated Structures, Computers and Structures, 50, 1, 47-57.
- Tsopelas, P. ve Constantinou, M.C., 1996. Experimental Study of FPS System in Bridge Seismic Isolation, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 25, 65-78.
- Türker, H., 2005. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi, Deprem Sempozyumu, Mart, Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 538-545.
- URL-1, <http://www.earthquakeprotection.com/TechnicalCharacteristicsofFPBearnings.pdf>, Technical Characteristics of Friction Pendulum Bearings, 23 Ağustos 2010.
- URL-2, Çoşkun E. ve Yazıcı G., www.e-kutuphane.imo.org.tr, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/9075.pdf>, 2 Aralık 2010.
- Vlassis A.G. ve Spyarakos C.C., 2001. Seismically Isolated Bridge Piers on Shallow Soil Stratum with Soil-Structure Interaction, Computer and Structures, 79, 32, 2847-2861.
- Wilson, E.L.. 1993. An Efficient Computational Method for Base Isolation and Energy Dissipation Analysis of Structural Systems, ATC-17-1, Applied Technology Council, March, San Francisco, ABD.
- Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2010. Modeling of Triple Concave Friction Pendulum in SAP2000 for Isolation of Buildings, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Karadeniz Technical University, Trabzon, Abstrack Book: 300.
- Yüksel Proje, 2007. Gülburnu Köprüsü'ne ait Proje Bilgileri, Yüksel İnşaat, Ankara.
- Zayas, V., Low, S. ve Mahin, S.A., 1987. The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, EERC Technical Report, UBC/EERC, 87-01.
- Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A. ve Bozzo L., 1989. Feasibility and Performance Studies on Improving the Eartquake Resistance of New Existing Building Using the Friction Pendulum System, Report No:UCB/EERC 89-09, University of California, Berkeley.
- Zayas, V., Low, S.S. ve Mahin, S.A., 1990. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, Earthquake Spectra, 6, 2, 317-333.
- Zekioğlu, A., Darama, H. ve Erkus, B., 2009. Performance-Based Seismic Design of A Large Seismically Isolated Structure: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building, Structural Engineers Association, 409-427.

Zhou, Q., Lu, X., Wang, Q., Feng, D.ve Yao, Q., 1994. Dynamic Analysis On Structures Base-Isolated by A Ball System With Restoring Property, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 27, 773-791.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet YURDAKUL, 1984 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokul 1. sınıfı 1990-1991 yılları arasında Trabzon Kanuni İlköğretim İlkokulu'nda, 2. - 8. Sınıfları 1991-1998 yılları arasında Trabzon Prof. İhsan Koz İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise 1998-2002 yılları arasında Trabzon Fatih Süper Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 2007 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı ve 2010 yılında Bayburt Üniversitesi'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilen YURDAKUL evlidir.