

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI SÜRTÜNME YÜZEYLİ SARKAÇ İZOLATÖRLERİN YAPI DEPREM DAVRANIŞI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhamad ZULFAKAR

**HAZİRAN 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI SÜRTÜNME YÜZEYLI SARKAÇ İZOLATÖRLERİN YAPI DEPREM
DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Muhamad ZULFAKAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 / 06 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 29 / 06 / 2021

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada; farklı sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörlerin yapı deprem davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmiştir. Çalışmanın oluşturulmasında bilgi, destek ve zamanını esirgemeyen saygıdeğer hocam, danışmanım, sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, eğitim ve öğrenim hayatı boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, sahip olduğum için kendimi şanslı hissettiğim başta annem, babam, kardeşlerim, ve arkadaşlarıma özellikle bu yolda yürümemde katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Sonunda rızık ve hidayet için güvendiğimiz Yüce Allah'a hamd olsun. Allah'ın bana verdiği her yön için, Yaradan ve Koruyucu Allah'a her zaman şükrediyorum.

Muhamad ZULFAKAR

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Farklı Sürtünme Yüzeyli Sarkaç İzolatörlerin Yapı Deprem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 01/06/2021

Muhamad ZULFAKAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Sürtünmeli Sarkaç İzolatör Türleri	4
1.2.1. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (TESS)	4
1.2.2. Çift Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (ÇESS)	6
1.2.3. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (ÜESS)	11
1.3. Rayleigh Sönüm.....	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	23
2.1. Yapı ve İzolatör Modelleri.....	23
2.2. Deprem Kaydı.....	27
2.3. Rayleigh Sönüm Katsayılarının Belirlenmesi.....	28
2.4. İzolatör Sonlu Eleman Model Güvenilirliği	30
2.4.1. TESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği	30
2.4.2. ÇESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği.....	32
2.4.3. ÜESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği.....	35
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	40
3.1. Sürtünme Yüzeyi Sayısı Farklı Sarkaç İzolatörlerin Yapı Davranışına Etkileri ..	41
3.2. Yüzey Sürtünme Katsayısının Yapı Davranışına Etkileri	53
3.3. Sürtünme Yüzeyi Eğrilik Yarıçapının Yapı Davranışına Etkileri	62
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73

5. KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FARKLI SÜRTÜNME YÜZEYLİ SARKAÇ İZOLATÖRLERİN YAPI DEPREM DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Muhamad ZULFAKAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ

2021, 77 Sayfa

Bu çalışmada tek, çift ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörler kullanılarak sismik izolasyonu sağlanmış beş katlı basit bir yapının zaman tanım alanında analizleri ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, üç eğrilikli sarkaç izolatörler için farklı sürtünme katsayıları ve sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçapları dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı sürtünme yüzeyi sayısına, farklı sürtünme katsayılarına ve eğrilik yarıçaplarına sahip izolatörler kendi aralarında ve ankastre mesnetli sonuçlarla karşılaştırılarak yapının deprem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla yapıda oluşan tepkiler maksimum görelî yerdeğiştirmeler, katlar arası ötelenme oranları, kat ivmeleri ve taban kesme kuvvetleri açısından irdelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre izolatörlerin kullanıldığı yapılarda oluşan tepkilerin ankastre mesnetli yapılara göre oldukça azaldığı görülmüştür. Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörler karşılaştırıldığında ise tüm bu tepkiler için üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün diğer izolatörlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca farklı sürtünme katsayılarına ve eğrilik yarıçaplarına sahip üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörlü yapılar incelendiğinde sürtünme katsayılarındaki artışın yapıda oluşan tepkileri artırdığı eğrilik yarıçapındaki artışın ise azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Sismik izolatör, sürtünmeli sarkaç izolatör, sürtünme katsayısı, eğrilik yarıçapı, zaman tanım alanında analiz.

Master Thesis

SUMMARY

PERFORMANCE COMPARISONS OF FRICTION PENDULUM BEARINGS WITH DIFFERENT SLIDING SURFACE CONFIGURATIONS

Muhamad ZULFAKAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Ali İhsan KARAKAŞ
2021, 77 Pages

In this thesis, time history analysis of a simple five-story structure with seismic isolation using single, double and triple friction pendulum bearings are carried out three dimensionally with the help of the ABAQUS finite element program. Furthermore, for the triple friction pendulum bearing, the analysis is also carried out by considering different friction coefficients and friction surface radii. As the results of the analysis, isolators with different friction surface numbers, different friction coefficients, and different friction surface radii are compared each other and with the results of a fixed supported structure. For this purpose, the structure reactions are measured in terms of maximum relative displacements, inter-story drift ratio, floor accelerations and base shear forces. Based on the results of the analysis, it is found that compared to the fixed support structure, the isolated structure reactions are significantly reduced. The comparison of isolators with different friction surface numbers shows that the triple friction pendulum bearing has a better performance for all structure reactions than other isolators. Moreover, when the results of triple friction pendulum bearings with different friction coefficients and different friction surfaces radii are examined, it is found that increasing the friction coefficient increases the reactions of the structure, while increasing the friction surface radii decreases the reactions of the structure.

Key words : Seismic isolator, friction pendulum isolator, coefficient of friction, friction surface radii, time history analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu yapı davranışı	1
Şekil 1.2.	(a) Kauçuk izolatör ve (b) kurşun çekirdekli kauçuk izolatör	2
Şekil 1.3.	(a) Düz yüzeyli ve (b) eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatör	3
Şekil 1.4.	TESS izolatörün (a) 3B görünümü ve (b) enkesiti	4
Şekil 1.5.	Yerdeğiştirme durumunda TESS izolatöründe oluşan kuvvetler ve yerdeğiştirmeler	5
Şekil 1.6.	TESS izolatörünün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	6
Şekil 1.7.	ÇESS izolatörün hareket aşamaları	7
Şekil 1.8.	Yerdeğiştirme durumunda üst içbükey yüzeyde kayıcının serbest cisim diyagramı.	8
Şekil 1.9.	ÇESS kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi	11
Şekil 1.10.	ÜESS'nin kesit görünümü ve temel parametreleri	12
Şekil 1.11.	Standart ÜESS izolatörün normalleştirilmiş omurga eğrisi	14
Şekil 1.12.	ÜESS izolatörün hareket aşamaları	14
Şekil 1.13.	Aşama 1'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	15
Şekil 1.14.	Aşama 2'nin kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	16
Şekil 1.15.	Aşama 3'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	17
Şekil 1.16.	Aşama 4'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	18
Şekil 1.17.	Aşama 5'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü	19
Şekil 1.18.	Rayleigh sönüm modelinde frekans ve sönümleme oranı ilişkisi.	22
Şekil 2.1.	Yapının üç boyutlu modeli	24
Şekil 2.2.	TESS izolatör sonlu eleman modeli	24
Şekil 2.3.	ÇESS izolatör sonlu eleman modeli	25
Şekil 2.4.	ÜESS izolatör sonlu eleman modeli	25
Şekil 2.5.	TESS, ÇESS ve ÜESS izolatör detayları	26
Şekil 2.6.	Northridge 1994 depremi ivme-zaman grafiği	27
Şekil 2.7.	Northridge 1994 depremi yerdeğiştirme-zaman grafiği	27

Şekil 2.8. Mod Şekilleri (a) 1. Mod (b) 2. Mod (c) 3. Mod (d) 4. Mod (e) 5. Mod ve (f) 6. Mod.....	29
Şekil 2.9. Dikkate alınan TESS izolatör detayları	30
Şekil 2.10. TESS izolatör için kuvvet-yerdeğiştirme karşılaştırması	31
Şekil 2.11. TESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme ve (b) 150 mm yerdeğiştirme durumu	32
Şekil 2.12. Dikkate alınan ÇESS izolatör detayları	32
Şekil 2.13. ÇESS izolatör için kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.....	34
Şekil 2.14. ÇESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme (b) aşama 1 ve (c) aşama 2 durumu	35
Şekil 2.15. Dikkate alınan ÜESS izolatör detayları	35
Şekil 2.16. ÜESS izolatör için kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	38
Şekil 2.17. ÜESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme (b) Aşama 1 (c) Aşama 2 (d) Aşama 3 (e) Aşama 4 ve (f) Aşama 5 durumu	39
Şekil 3.1. Kat yerdeğiştirmeleri	40
Şekil 3.2. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin katlar arası ötelenme oranları.....	42
Şekil 3.3. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğiştirmeleri	43
Şekil 3.4. Ankastre mesnet ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin kat yerdeğiştirme değerlerinin zaman ile değişimi	44
Şekil 3.5. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri	45
Şekil 3.6. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi.....	46
Şekil 3.7. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapılar için kolon maksimum taban kesme kuvvetleri	47
Şekil 3.8. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapılar için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi.....	48
Şekil 3.9. Kolon 1 altındaki TESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme	49
Şekil 3.10. Kolon 2 altındaki TESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme	49
Şekil 3.11. Kolon 1 altındaki TESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu	50
Şekil 3.12. Kolon 1 altındaki ÇESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme	50

Şekil 3.13. Kolon 2 altındaki ÇESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme	51
Şekil 3.14. Kolon 1 altındaki ÇESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	51
Şekil 3.15. Kolon 1 altındaki ÜESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü .	52
Şekil 3.16. Kolon 2 altındaki ÜESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü .	52
Şekil 3.17. Kolon 1 altındaki ÜESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	52
Şekil 3.18. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kat ötelenme oranları.....	54
Şekil 3.19. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlardaki maksimum görelî yerdeğiştirmeler	55
Şekil 3.20. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için görelî kat yerdeğiştirmelerinin zaman ile değişimi	56
Şekil 3.21. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri	57
Şekil 3.22. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi.....	58
Şekil 3.23. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kolon taban kesme kuvvetleri	59
Şekil 3.24. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi	60
Şekil 3.25. Kolon 1 altındaki ÜESS1 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü.....	61
Şekil 3.26. Kolon 1 altındaki ÜESS3 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü.....	61
Şekil 3.27. Kolon 1 altındaki ÜESS1 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	62
Şekil 3.28. Kolon 1 altındaki ÜESS3 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	62
Şekil 3.29. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları.....	64
Şekil 3.30. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğiştirmeleri	65

Şekil 3.31. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için kat yerdeğiştirmenin zaman ile değişimi	66
Şekil 3.32. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri	67
Şekil 3.33. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi	68
Şekil 3.34. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kolon taban kesme kuvvetleri	69
Şekil 3.35. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi	70
Şekil 3.36. Kolon 1 altındaki ÜESS4 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü.....	71
Şekil 3.37. Kolon 1 altındaki ÜESS6 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü.....	71
Şekil 3.38. Kolon 1 altındaki ÜESS4 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	72
Şekil 3.39. Kolon 1 altındaki ÜESS6 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu.....	72

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Sürtünme katsayıları farklı model türleri.....	26
Tablo 2.2. Sürtünme yüzey eğrilik yarıçapları farklı model türleri	27
Tablo 2.3. Modal analiz sonuçları.....	28
Tablo 3.1. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları.....	41
Tablo 3.2. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için maksimum yerdeğiştirmeler	43
Tablo 3.3. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri	45
Tablo 3.4. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları.....	53
Tablo 3.5. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlardaki maksimum görelî yerdeğiştirmeler	55
Tablo 3.6. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri	57
Tablo 3.7. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları.....	63
Tablo 3.8. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğiştirmeleri	65
Tablo 3.9. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri	67

SEMBOLLER DİZİNİ

a, b	Orantılılık katsayıları
d	Deplasman kapasitesi
d_s	Katlar arası ötelenme oranı
f_s	Geri yükleme vektörü
f_d	Sönüm vektörü
F	Kuvvet
F_f	Sürtünme kuvveti
F_n	Tepki kuvveti
g	Yerçekimi (9.81 m/s ²)
h	Merkezden uzaklık
H_s	Kat yüksekliği
k_b	Yatay rijitlik
N	Serbestlik derecesi sayısı
R	Yarıçap
R_{eff}	Etkili yarıçap
T_b	Doğal periyot
u	Bağıl yerdeğiştirme vektörü
$u_{üst}$	Üst katın yatay yerdeğiştirmesi
u_{alt}	Alt katın yatay yerdeğiştirmesi
$\dot{u}$	Bağıl hız vektörü

$\ddot{u}$	Görelı ıvme vektörü
$\ddot{u}_g$	Yer ıvme vektörü
W	Yapı ağırlığı
μ	Sürtünme katsayısı
μ_e	Etkili sürtünme katsayısı
θ	Dönme açısı
ξ_n	n 'inci mod sönüm oranı
ω_n	n 'inci mod açısal frekans
$[c]$	Sönüm matrisi
$[k]$	Rijitlik matrisi
$[m]$	Kütle matrisi

1. GENEL BİLGİLER

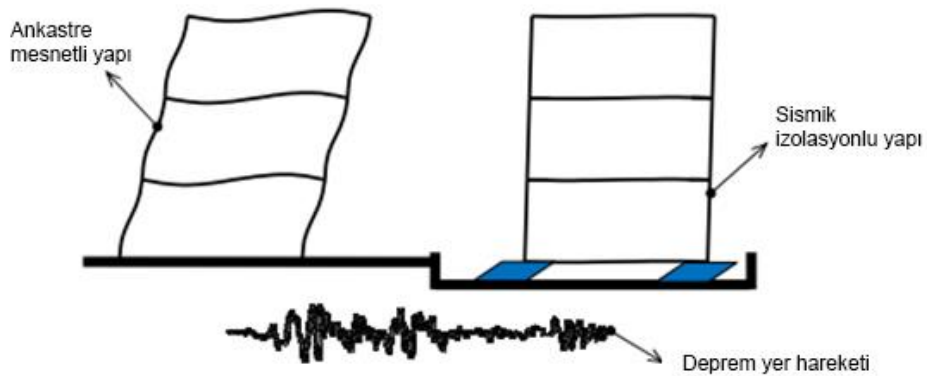
1.1. Giriş

Depremler, yeryüzünde sıklıkla meydana gelen doğal olaylardır. Şiddetli depremler esnasında dünyanın litosferindeki tektonik plakaların hareketinden dolayı yapılar yatay ve düşey yönde sarsılarak zarar görmektedir. Bu durumu engellemek amacıyla uygulanabilecek yöntemlerden biri sismik izolasyondur.

Sismik izolasyon kuvvetli depremlerden kaynaklanan hasarları ve can kayıplarını azaltmak için kullanılan en etkin tekniklerden biridir. Sismik izolasyon sistemlerinin kullanılması bir yapının ilk yapım maliyetini artırsa da, yapının artan sismik performansı can güvenliğini sağlamanın yanı sıra doğrudan ve dolaylı finansal kayıpları azaltmaktadır. İzolasyon sistemleri ile mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesi benzer ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Deringöl ve Güneyisi, 2019).

Sismik izolasyon sistemleri, yapının doğal titreşim periyodunu depreminin hakim periyodunun ötesine taşıyarak rezonans etkisinden kaynaklanan atalet yüklerinin azalmasını sağlar (Moeindarbari ve Taghikhany, 2014). Bir başka ifadeyle izolasyon sistemleri, yapıyı fiziksel olarak deprem yer hareketinden ayırarak depremin yapı üzerinde oluşturacağı enerjiyi azaltır. Böylece yalıtılmış yapıların yer değiştirmesi, hızı ve ivmesi gibi deprem tepkilerini kabul edilebilir ve güvenli değerlere düşürür (Namiranian vd., 2016).

Şekil 1.1 sismik izolasyonlu ve ankastre mesnetli bir yapının deprem davranışını temsil etmektedir.



Şekil 1.1. Ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu yapı davranışı

Sıklıkla kullanılan iki tip sismik izolasyon sistemi vardır. Bunlar elastomer izolatörlü ve sürtünmeli izolatörlü sistemlerdir. Bir elastomer izolatör, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi düşey yönde oldukça rijitken yatay yönde esneklik sağlamak amacıyla değişen çelik ve kauçuk katmanlar içermektedir. Kurşun çekirdekler ise etkili sönümleme ve hareket öncesi yatay rijitlik sağlamak amacıyla genellikle elastomer izolatörlere eklenirler.



Şekil 1.2. (a) Kauçuk izolatör ve (b) kurşun çekirdekli kauçuk izolatör

Şekil 1.3'te gösterildiği gibi sürtünmeli izolatörler iki ana kategoriye ayrılır: düz yüzeyli izolatörler ve eğri yüzeyli sarkaç izolatörler. Eğri yüzeyli sarkaç izolatörler, içbükey plakalardan ve küresel yüzeylere sahip ara kayıcılardan oluşur. Düşey kuvvet ve küresel yüzeylerin kombinasyonu, geri yükleme (merkezleme) kuvveti sağlarken, yüzeyler arasındaki sürtünme ilk yatay rijitliği sağlar ve kayma meydana geldiğinde kinematik enerjiyi dağıtır. Sürtünmeli sarkaç izolatörler genelde tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörler, çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörler ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörler olarak sınıflandırılır.



Şekil 1.3. (a) Düz yüzeyli ve (b) eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolator

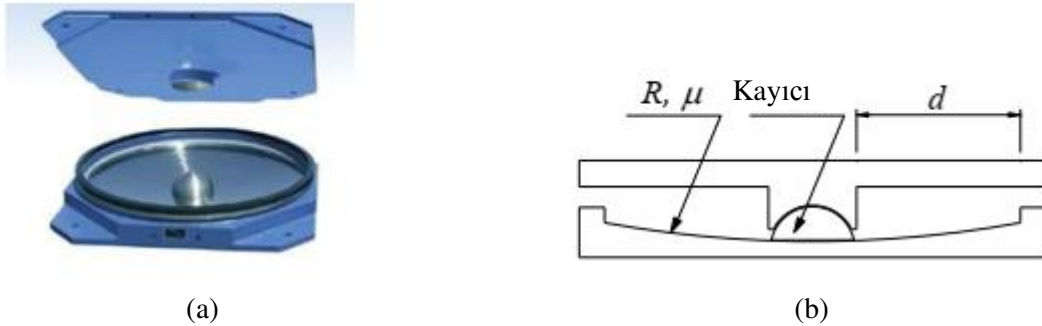
Depremelerin yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada sürtünmeli sarkaç izolatorlerin potansiyelini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Fenz ve Constantinou (2008b, 2008c) uyarlanabilir davranışa sahip küresel sürtünmeli sarkaç izolator hakkında teorik ve deneysel araştırmalar yürütmüşlerdir. Pigouni vd., (2020) bire bir ölçekli sarkaç izolatorler üzerinde deneysel dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Deringöl (2018) sürtünmeli sarkaç izolator kullanılan iki boyutlu çelik çerçevelerin sismik tepkisinin değerlendirilmesi için çeşitli tasarım yaklaşımlarını araştırmıştır. Calvi vd., (2016) tarafından düz ve eğri yüzeyli sarkaç izolatorlerin performanslarının artırılması amacıyla farklı sürtünme özelliklerine sahip malzemeler kullanılarak daha yüksek enerji yutma kapasiteli izolatorler araştırılmıştır. Yurdakul ve Ateş (2011) tarafından üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatorün sismik izolasyon cihazı olarak tek ve çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolator sistemine karşı verimliliği iki boyutlu analizler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda sürtünmeli sarkaç izolator performansını belirleyen en önemli parametrelerin sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçapı ve sürtünme katsayısı olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu bağlamda bu çalışmanın amacı, ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla tek, çift ve üç eğrilikli farklı sürtünme yüzeyi sayısına, farklı eğrilik çaplarına ve sürtünme katsayılarına sahip izolatorlerin üç boyutlu modellerini oluşturarak zaman tanım alanında analizler ile basit bir yapı modeli üzerindeki etkilerini incelemektir.

1.2. Sürtünmeli Sarkaç İzolatör Türleri

1.2.1. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (TESS)

Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TESS) izolatör, son yıllarda sismik izolasyon teknolojisinde kullanılan popüler bir cihazdır. İlk olarak 1987 yılında Zayas tarafından tanıtılmıştır (Zayas vd., 1990). Bu cihaz paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve Şekil 1.4'te gösterildiği gibi bir geometrik yapıya sahiptir. İzolatör, R yarıçaplı kavisli bir yüzey üzerinde kayma mafsallı bir kayıcıdan oluşur. Üst yapının toplam ağırlığı (W) ile eğrilik yarıçapı (R), izolatörün yatay rijitliğini ve kayıcıyı merkezi konuma hareket ettiren geri yükleme kuvveti sağlar. Aynı zamanda izolatörün sürtünme katsayısı, izolatörü stabil halde tutmak ve kayma meydana geldiğinde deprem enerjisinin bir kısmını dağıtmak için yatay rijitlik sağlar. TESS izolatörünün yatay yer değiştirme kapasitesi, Şekil 1.4 (b) 'de gösterildiği gibi d kadardır. Eğimli yüzeyin yarıçapı (R) ve sürtünme katsayısı (μ), yapının davranışına karar veren izolatörün önemli en parametreleridir (Nguyen vd., 2018).



Şekil 1.4. TESS izolatörünün (a) 3B görünümü ve (b) enkesiti

Zayas vd., (1990) çalışmalarında tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç hareketini ayrıntılı olarak anlatmışlardır. Zayıf deprem etkisinde izolatörde oluşan yatay kuvvet kayıcı ile eğimli yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinden daha küçük olduğunda, kayma hareketi meydana gelmez. Tabandan izole edilmiş yapı, bu nedenle, ankastre mesnet yapısı gibi davranır. Yani TESS izolatörü Şekil 1.4(b)'de gösterildiği sabit kalır. Deprem yeterince güçlü olduğunda, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi yatay kuvvet (F) sürtünme kuvvetinden (F_f) büyük olur ve kayma meydana gelir. Bu durumda oluşan kuvvet bileşenleri ve yatay yerdeğiştirmeler Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Kayıcının yatay yer değiştirmesi u

olduğunda, izolatörün kuvvet ve yatay yer değiştirme ilişkisi, kuvvet dengesi temelinde kurulmaktadır.

Kayıcının u yatay yer değiştirmesindeki yatay ve düşey kuvvetler dengesi dikkate alınarak, bunlar arasındaki ilişkiler sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir:

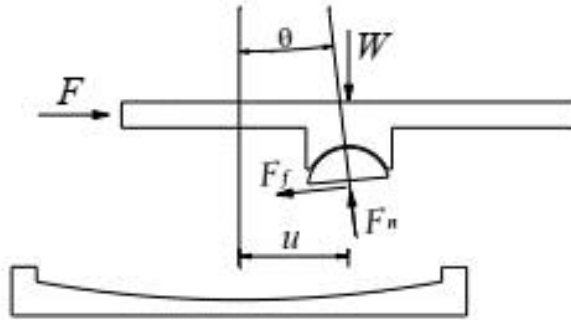
$$F = F_n \sin \theta + F_f \cos \theta \quad (1.1)$$

$$W = F_n \cos \theta - F_f \sin \theta \quad (1.2)$$

F_n , eğri yüzeyden dolayı kayıcıda oluşan tepki kuvveti, F_f sürtünme kuvveti bileşeni ve θ kayıcının dönme açısıdır. Bu parametreler aşağıdaki Denklem (1.3) ve Denklem (1.4) ile ifade edilmektedirler:

$$F_f = \mu F_n \quad (1.3)$$

$$\sin \theta = \frac{u}{R} \quad (1.4)$$



Şekil 1.5. Yerdeğiştirme durumunda TESS izolatöründe oluşan kuvvetler ve yerdeğiştirmeler

R eğrilik yarıçapının u yer değiştirmesine kıyasla yeterince büyük olduğu varsayılır. Böylece dönme açısı θ çok küçüktür ve yaklaşık olarak: $\mu \sin \theta = 0$ ve $\cos \theta = 1$ şeklinde ifade edilebilir. Denklem (1.1), (1.2), (1.3) ve (1.4) birleştirilirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \quad (1.5)$$

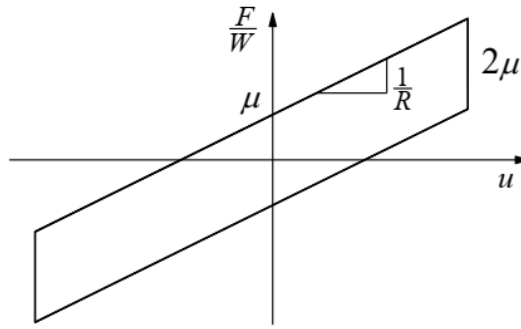
Denklem (1.5)'te, (W_u/R) bileşeni geri yükleme kuvvetidir. Buna göre, TESS izolatörünün yatay rijitliği k_b 'si aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_b = \frac{W}{R} \quad (1.6)$$

ve TESS izolatörün doğal titreşim periyodu aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_b}} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk_b}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.7)$$

TESS izolatörün analitik olarak elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 1.6'da gösterilmektedir.

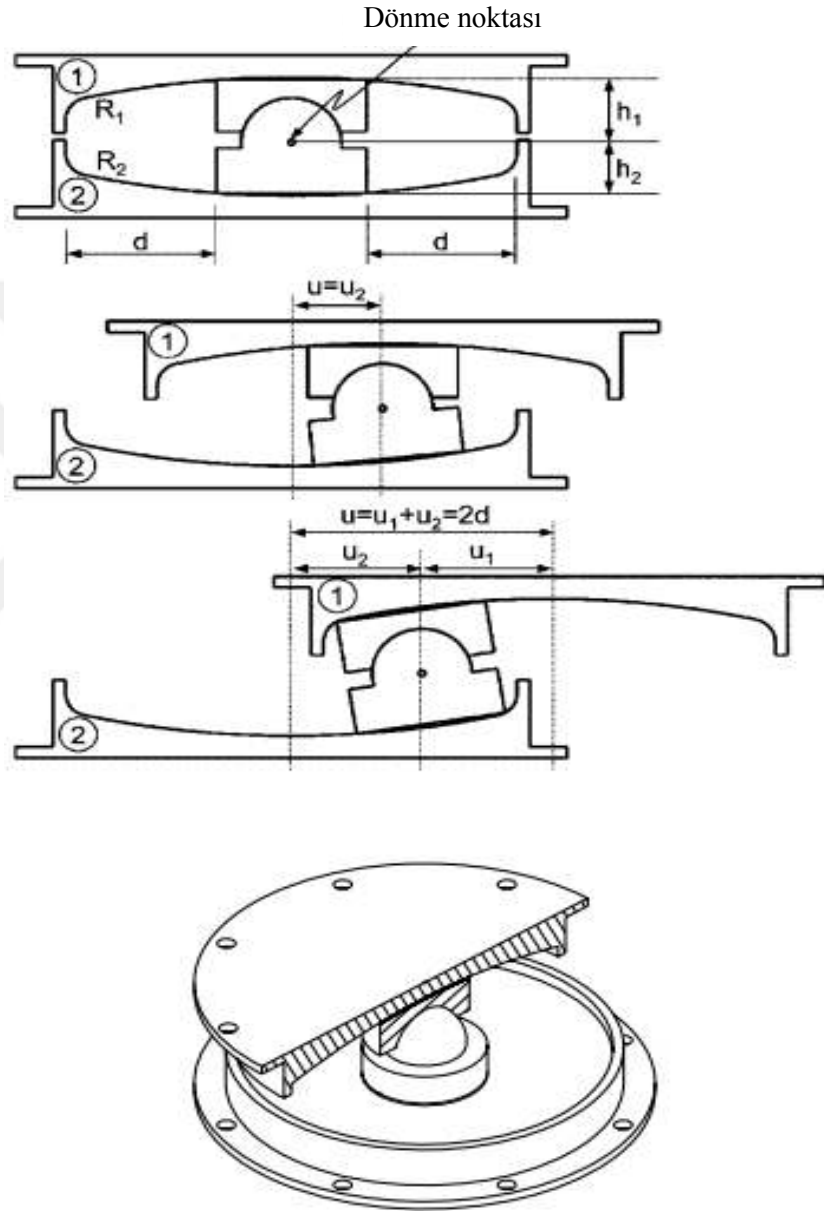


Şekil 1.6. TESS izolatörünün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

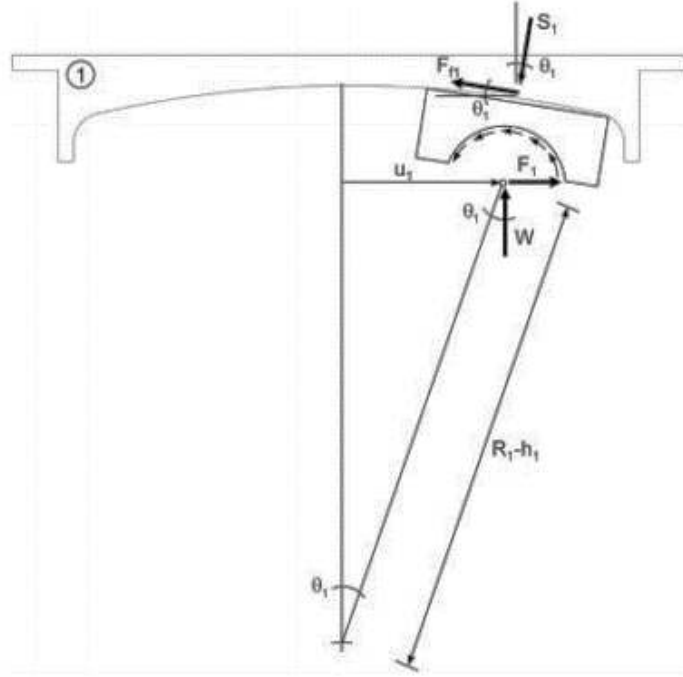
1.2.2. Çift Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (ÇESS)

Şekil 1.7 çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç (ÇESS) izolatörün sıfır yerdeğiştirmedeki enkesitini, yalnızca alt içbükey yüzeyde kaymaya maruz bıraktığındaki durumunu ve alt yüzeydeki sürtünme katsayısının üst yüzeydeki sürtünme katsayısından daha az olduğu durumda mümkün olan üst yüzey kayma durumunu göstermektedir. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi yatay hareket, mafsalı kayıcının dönmesini gerektirir. Sürtünmenin iki kayma yüzeyinde tam olarak aynı olamayacağı göz önüne alındığında kayıcının her zaman bir miktar döneceği düşünülür. Bu sebeple kayıcı eklemli (mafsallı) oluşturulur ve kayıcının düzensiz aşınmaya maruz kalması önlenir. İzolatörün en büyük yer değiştirme kapasitesi $2d$

kadardır, burada d , tek bir içbükey yüzeyin en büyük yer değiştirme kapasitesidir. Rijit gövde ve kayıcının göreceli dönüşü nedeniyle, yer değiştirme kapasitesinin $2d$ 'den biraz farklı olacağına dikkat edilmelidir. (Fenz ve Constantinou, 2006).



Şekil 1.7. ÇESS izolatörün hareket aşamaları



Şekil 1.8. Yerdeğiştirme durumunda üst içbükey yüzeyde kayıcının serbest cisim diyagramı.

ÇESS izolatörü için analitik kuvvet-yer değişirme ilişkisini türetmek amacıyla üst ve alt yüzeylerin hareketleri ayrı ayrı ele alınır ve ardından izolatör için ilişki elde etmek üzere denge ve uyumluluk temelinde birleştirilir. Şekil 1.8'de gösterilen yerdeğiştirme durumunda üst içbükey yüzeyde bulunan kayıcının serbest cisim diyagramı incelendiğinde, kayıcıya etki eden kuvvetler:

- Dönme noktasında etkiyen düşey yük, W .
- İzolatörün alt kısmından aktarılan ve kayıcının üst kısmına etki eden yanal kuvvet F_1 .
- Kayma arayüzü boyunca hareket eden sürtünme kuvveti, F_{f1}
- Kayma arayüzüne etki eden normal basınç kuvveti, S_1 .

Yatay ve düşey doğrultulardaki denge dikkate alınarak aşağıdaki ilişkiler elde edilir:

$$F_1 - S_1 \sin \theta_1 - F_{f1} \cos \theta_1 = 0 \quad (1.8)$$

$$W - S_1 \cos \theta_1 + F_{f1} \sin \theta_1 = 0 \quad (1.9)$$

Geometriden, kayıcının üst içbükey yüzeydeki yerdeğiştirmesi, u_1

$$u_1 = (R_1 - h_1) \sin \theta_1 \quad (1.10)$$

olarak ifade edilir ve burada $R_1 - h_1$, küresel yüzeyin merkezinden eklemli sürgünün dönme noktasına olan mesafedir. Bu mesafeler iki kayma yüzeyi için etkin yarıçap olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi elde edilirler:

$$R_{eff1} = (R_1 - h_1) \quad (1.11)$$

$$R_{eff2} = (R_2 - h_2) \quad (1.12)$$

Denklem (1.8), (1.9) ve (1.10) birleştirildiğinde, bir içbükey kayma yüzeyde hareketi yöneten kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, geleneksel sürtünmeli sarkaç izolator kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisidir. Üst içbükey kayma yüzeyi için

$$F_1 = \frac{W}{R_{eff1} \cos \theta_1} u_1 + \frac{F_{f1}}{\cos \theta_1} \quad (1.13)$$

Alt içbükey yüzey için

$$F_2 = \frac{W}{R_{eff2} \cos \theta_2} u_2 + \frac{F_{f2}}{\cos \theta_2} \quad (1.14)$$

şeklinde kuvvet-yerdeğiştirme denklemleri elde edilir. Burada F_2 , izolatorün üst kısmı boyunca aktarılan ve alt kayıcıya etki eden kuvvettir ve u_2 , kayıcının alt içbükey yüzey boyunca yerdeğiştirmesidir. F_{f2} , alt kayma yüzeyi boyunca hareket eden sürtünme kuvveti ve θ_2 , mafsallı kayıcının alt kısmının dönmesini temsil eden açıdır.

Tipik olarak, eğrilik yarıçapları u_1 ve u_2 yerdeğiştirmelerine kıyasla çok büyüktür ve bu durum, dönme açılarının çok küçük olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda aşağıdaki basitleştirmeler ihmal edilebilir doğruluk kaybıyla yapılabilir:

$$F_1 = \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + F_{f1} \quad (1.15)$$

$$F_2 = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2} \quad (1.16)$$

Denklem (1.15) ve (1.16), sırasıyla üst ve alt kayma yüzeyleri için kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisini ifade etmektedir.

İzolatörün tamamı için, u , toplam yerdeğiştirme üst ve alt yüzeylerdeki yerdeğiştirmelerin toplamıdır:

$$u = u_1 + u_2 \quad (1.17)$$

Ayrıca, kayıcının yatay doğrultudaki kuvvet dengesi dikkate alındığında:

$$F = F_1 = F_2 \quad (1.18)$$

olmalıdır. Denklem (1.15) - (1.18) kullanılarak, izolatörün tamamı için kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi şu şekilde elde edilir:

$$F = \left(\frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) u + \left(\frac{F_{f1}R_{eff1} + F_{f2}R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) \quad (1.19)$$

ve her bir kayma yüzeyindeki bireysel yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u_1 = \left(\frac{F - F_{f1}}{W} \right) R_{eff1} \quad (1.20)$$

$$u_2 = \left(\frac{F - F_{f2}}{W} \right) R_{eff2} \quad (1.21)$$

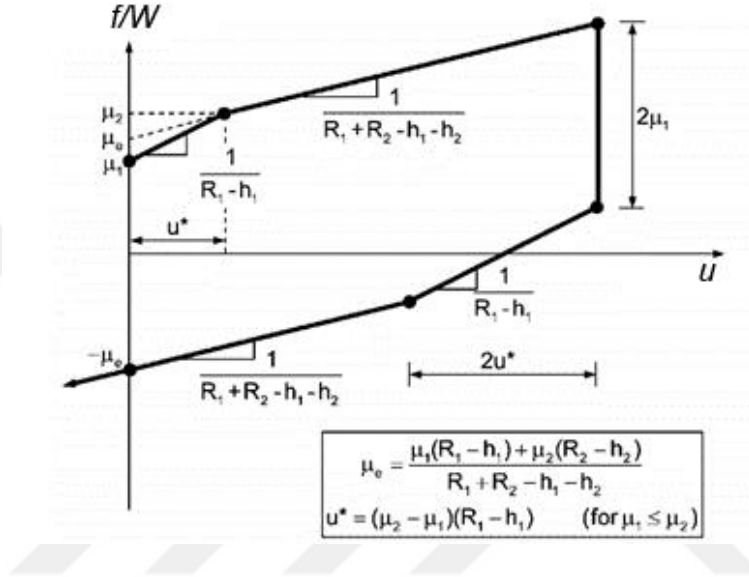
Tsai vd. (2000) tarafından sunulan Denklem (1.19) kayıcının yüksekliğinin etkisi dışında, yalnızca kayma her iki içbükey yüzeyde aynı anda meydana geldiğinde geçerlidir. Kayma yüzlerindeki sürtünmenin eşit olmadığı durum düşünüldüğünde, örneğin $F_{f1} < F_{f2}$ olur. Yanal F kuvvetinin uygulanmasında $F_{f1} < F < F_{f2}$ durumunda, kayma sadece en küçük sürtünmenin olduğu yüzeyde meydana gelecektir. Hareket, her iki kayma yüzeyinde başlayacağı zamana kadar ($F = F_{f2}$ olana kadar) sadece birinci yüzey boyunca ($u_1 = u$, $u_2 = 0$) devam edecektir. Bu durumda aşağıdaki u^* yer değiştirmesi meydana gelir:

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1} \quad (1.22)$$

burada $\mu_1 = F_{f1}/W$ ve $\mu_2 = F_{f2}/W$, iki kayma yüzündeki sürtünme katsayılarıdır ($\mu_1 < \mu_2$). Bu nedenle Denklem (1.19) yalnızca $u \geq u^*$ olduğunda geçerlidir. $u < u^*$ olduğunda, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi $\mu_1 < \mu_2$ için Denklem (1.15) ve $\mu_2 < \mu_1$ için Denklem (1.16) tarafından yönetilir. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki Şekil 1.9'da gösterilmektedir.

Her iki içbükey kayma yüzeyi üzerine etki eden sürtünme kuvveti $\mu_e W$ 'ye eşittir, burada μ_e etkin sürtünme katsayısıdır. Denklem (1.19)'un ikinci teriminden etkin sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (1.23)$$



Şekil 1.9. ÇESS kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

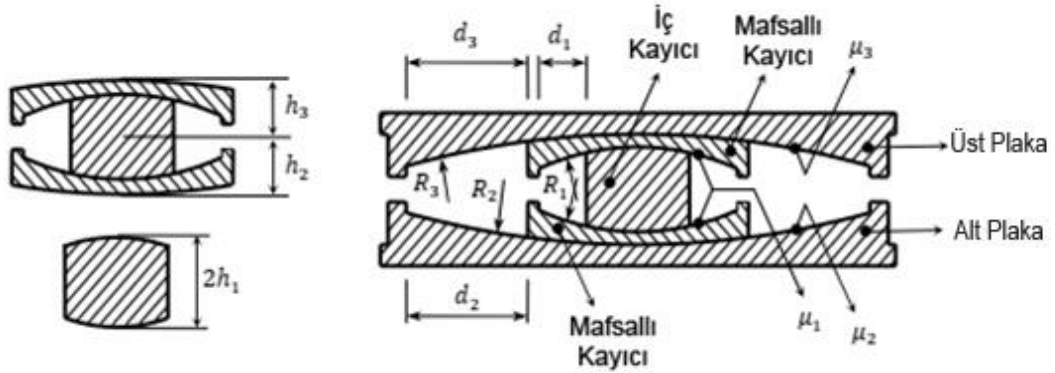
1.2.3. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör (ÜESS)

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç (ÜESS) izolatör yaygın olarak kullanılan bir izolatör türüdür. Xu vd., (2019), Loghman vd., (2015), Malekzadeh ve Taghikhany (2012), Reyes vd., (2020) gibi birçok çalışmada ÜESS izolatörün avantajlarını açıklanmıştır. Bir ÜESS izolatörün genel bileşenleri Şekil 1.10'da gösterilmektedir. İzolatör küresel yüzeylere sahip iki mafsallı içbükey arasında kayabilen ve daha sonra üst ve alt içbükey plakalar arasında kayabilen bir iç kayıcıdan oluşur. Yüzeyler arasındaki sürtünme, küçük yatay yüklere hareket olmaksızın direnir ve büyük yatay yük altında yüzeyler arasında oluşan kayma sırasında enerjiyi dağıtır. Düşey yük ile birlikte yüzeylerin eğriliği yatay yerdeğiştirme meydana geldiğinde bir geri yükleme kuvveti (merkezeleme kuvveti) oluşturur (Dao, 2012).

ÜESS izolatör üç sarkaç mekanizması ile hareket etmektedir. Birinci sarkaç mekanizması, iç kayıcı ve iki mafsallı kayıcı tarafından oluşturulur. İç kayıcının küresel yarıçapı R_1 küçük olduğundan nispeten büyük bir rijitliğe yol açarken yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının μ_1 da küçük oluşu küçük depremler altında kayma hareketinin meydana gelmesini sağlar.

İkinci sarkaç mekanizması, alt mafsallı kayıcı ve alt içbükey plaka tarafından oluşturulur. Bu yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı μ_2 , orta şiddette depremler altında kaymayı devreye alacak şekilde seçilir. Bu sarkaç mekanizması küçük bir rijitliğe sahiptir çünkü küresel içbükey plakanın yarıçapı R_2 büyüktür.

Üçüncü sarkaç mekanizması, üst mafsallı kayıcı ve üst içbükey plaka tarafından oluşturulur. Bu yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı μ_3 büyüktür. Dolayısıyla kayma yalnızca büyük depremler sırasında meydana gelir. Alt mafsallı kayıcının yer değiştirme sınırı yeterince büyüktür, böylece her iki mafsallı kayıcı, üst yapıda ivme tepkisini sınırlamak için çok küçük yatay rijitlik sağlayan üçüncü sarkaç mekanizmasında kayabilir.



Şekil 1.10. ÜESS'nin kesit görünümü ve temel parametreleri

Özet olarak, bir ÜESS izolatörün tepkisini yüzeyler arasındaki sürtünme katsayıları μ_i , yer değiştirme sınırları d_i ve etkin sarkaç uzunlukları $R_{effi} = R_i - h_i$ gibi tasarım parametreleri belirlemektedir.

Tek ve çift sarkaçlı izolatörlere göre ÜESS'ler, izolatörlerin boyutunu artırmadan daha büyük yer değiştirme kapasitesi sağlayarak daha uygun maliyetli bir tasarım sağlamaktadır. Ayrıca farklı deprem seviyelerinde performansı optimize etmek için kullanılabilecek çok

aşamalı davranış göstermektedirler. Üç eğrilikli sürtünmeli sarkacın teorik davranışı, Fenz ve Constantinou (2008a), Morgan ve Mahin (2011) tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Şekil 1.10'da gösterilen karakteristik boyutlara ve sürtünme katsayılarına sahip bir izolatör düşünün. Küresel yüzeylerin etkili yarıçaplarının:

$$R_{eff1} = (R_1 - h_1); R_{eff2} = (R_2 - h_2); R_{eff3} = (R_3 - h_3) \quad (1.24)$$

Genelleştirilmiş bir üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün yatay kuvvet deformasyonu için tek yönlü omurga eğrisi, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi 5 aşamaya bölünebilir. Bu şekilde, normalize edilmiş yatay kuvvet $f = F/W$ kullanıldığına ve eğrinin normalleştirilmiş omurga eğrisi olarak adlandırıldığına dikkat etmektedir. İzolatör boyutlarının ve sürtünme katsayılarının aşağıdaki koşulları sağlaması gerekmektedir (Dao, 2012):

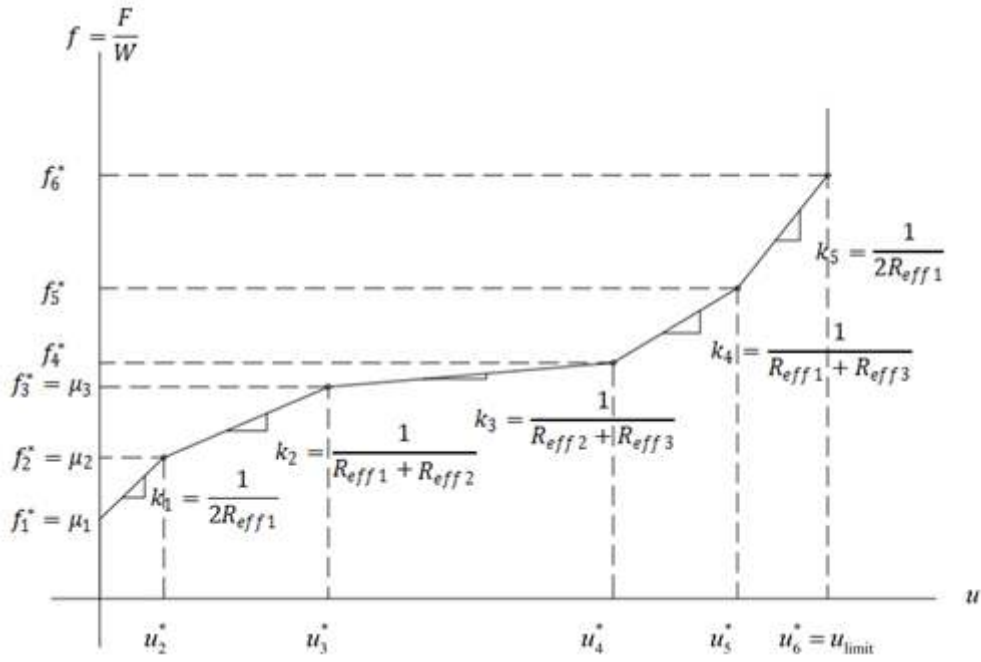
$$R_{eff1} < R_{eff2} = R_{eff3} \quad (1.25)$$

$$\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 \quad (1.26)$$

$$d_1 > (\mu_3 - \mu_1)R_{eff1} \quad (1.27)$$

$$\mu_3 < \frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \quad (1.28)$$

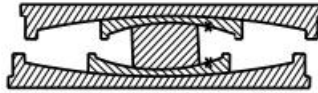
Sarkaç uzunlukları (eğrilik yarıçapları) üzerindeki kısıtlama (Denklem 1.25), izolatörün küçük depremlerde yüksek rijitlikte ve orta şiddetli depremlerde daha düşük rijitlikte etkinleştirilmesini sağlamaktadır. Sürtünme katsayıları üzerindeki kısıtlama (Denklem 1.26) öncelikle iç kayıcı sonra alt mafsallı kayıcı ve daha sonra üst mafsallı kayıcının hareket etmesini sağlamaktadır. Denklem (1.27) kısıtlaması, omurga eğrisinin sonunda sertleşme aşamasını etkinleştirmek için iç kayıcıdan önce mafsallı kayıcılarda yer değiştirme sınırlarına ulaşılmasını garanti etmektedir. Denklem (1.28) kısıtlaması ise izolatör sertleşme aşamasına girmeden önce tüm yüzeylerde kaymanın meydana gelmesini garanti etmektedir.



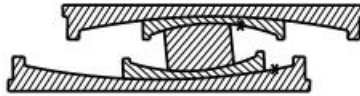
Şekil 1.11. Standart ÜESS izolatörün normalleştirilmiş omurga eğrisi

Şekil 1.12'de izolatör hareketinin beş aşaması gösterilmektedir. Bu aşamaların açıklamaları aşağıda verilmektedir.

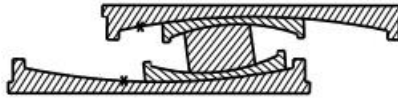
Aşama 1



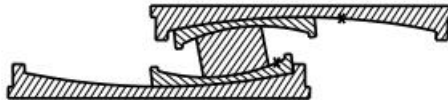
Aşama 2



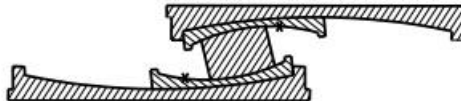
Aşama 3



Aşama 4



Aşama 5



Not: "x" ile işaretlenmiş yüzeyler, kaymanın meydana geldiği yüzeylerdir

Şekil 1.12. ÜESS izolatörün hareket aşamaları

Aşama 1: İç kayıcı, iki mafsallı kayıcı arasında kayar.

Yatay kuvvet, iç kayıcı ile alt mafsallı kayıcı arasındaki sürtünme kuvvetini aştığında, iç kayıcı ile üst mafsallı kayıcı arasındaki sürtünme kuvvetine eşittir. Böylece iç kayıcı iki mafsallı kayıcı arasında kayar.

Bu aşamada omurga eğrisinin normalleştirilmiş rijitliği aşağıdaki gibi elde edilir:

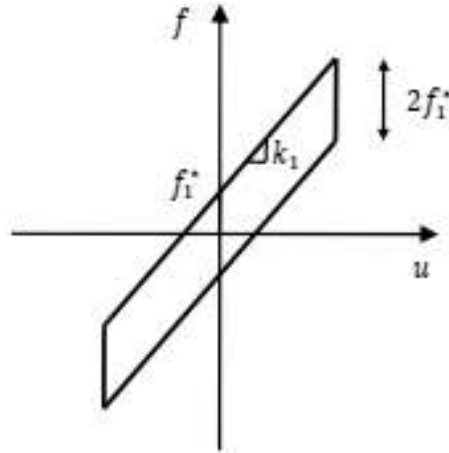
$$k_1 = \frac{1}{2R_{eff1}} \quad (1.29)$$

Bu aşamanın en büyük yer değiştirmesi ve normalleştirilmiş kuvveti aşağıdaki gibidir:

$$u_2^* = 2R_{eff1}(\mu_2 - \mu_1) \quad (1.30)$$

$$f_2^* = \mu_2 \quad (1.31)$$

Şekil 1.13'te aşama 1'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Aşama 1'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Aşama 2: İç kayıcı, üst mafsallı kayıcı üzerinde kayar ve alt mafsallı kayıcı, alt içbükey plakada kayar.

Normalleştirilmiş yatay kuvvet f , $f_2^* = \mu_2$ 'yu aştığında, mafsallı kayıcı ile alt içbükey plaka arasında görelî kayma meydana gelecektir. İç kayıcı ile üst mafsallı kayıcı arasındaki temas yüzeyindeki kayma da devam eder. Yatay kuvvet artışını dengelemek için iç kayıcı eğimini artırarak kayar. Daha sonra iç kayıcı, alt mafsallı kayıcı üzerinde kaymayı durdurur, çünkü artan yatay kuvvet alt içbükey plaka üzerindeki iç kayıcının eğimi ve alt mafsallı kayıcı tarafından karşılanır. Yani bu aşamada artan yatay kuvvet, iç kayıcının artan eğiminden sağlanmaktadır. İç kayıcının üst kısmındaki bu eğim, iç kayıcı ile üst mafsallı kayıcı arasındaki kaymadan meydana gelmektedir. İç kayıcının alt kısmındaki eğim ise alt mafsallı kayıcı ile alt içbükey plaka arasındaki kaymadan kaynaklanmaktadır.

Bu aşamada omurga eğrisinin normalleştirilmiş rijitliği aşağıdaki gibi elde edilir:

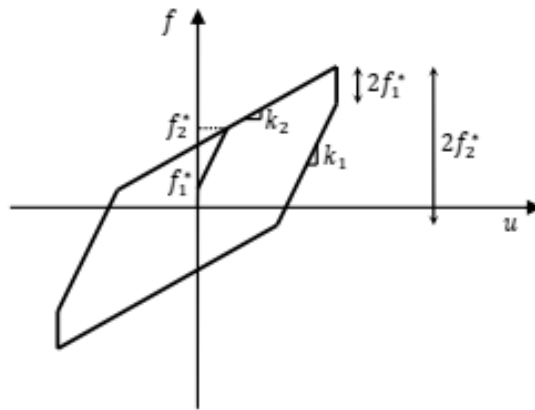
$$k_2 = \frac{1}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (1.32)$$

Bu aşamanın en büyük yer değıştirmesi ve normalleştirilmiş kuvveti aşağıdaki gibidir::

$$u_3^* = R_{eff1}(\mu_2 + \mu_3 - 2\mu_1) + R_{eff2}(\mu_3 - \mu_2) \quad (1.33)$$

$$f_3^* = \mu_3 \quad (1.34)$$

Aşama 2'nin kuvvet-yerdeğıştirme döngüsü Şekil 1.14'te gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Aşama 2'nin kuvvet-yerdeğıştirme döngüsü

Aşama 3: Alt mafsallı kayıcı alt içbükey plaka üzerinde kayar ve üst mafsallı kayıcı üst içbükey plaka üzerinde kayar.

Yatay kuvvet, üst mafsallı kayıcı ile üst içbükey plaka arasındaki sürtünme kuvvetini aştığında, bileşenler arasında kayma meydana gelir. Bu aşamada, alt mafsallı kayıcı, alt içbükey plaka üzerinde kaymaya devam eder, ancak iç kayıcı ile üst mafsallı kayıcı arasındaki kayma durur. Artan yatay kuvvet, iki mafsallı kayıcının üstte ve altta bulunan iki içbükey plaka üzerinde kaymasının neden olduğu iç kayıcının artan eğimi ile sağlanır.

Bu aşamada omurga eğrisinin normalleştirilmiş rijitliği aşağıdaki gibi elde edilir:

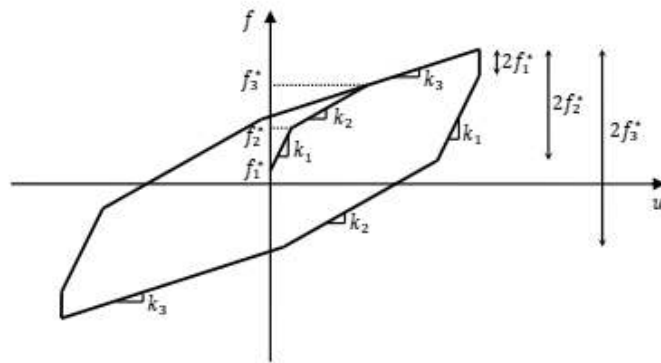
$$k_3 = \frac{1}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad (1.35)$$

Bu aşamanın en büyük yer değiştirmesi ve normalleştirilmiş kuvveti aşağıdaki gibidir:

$$u_4^* = u_3^* + \left(\frac{d_2}{R_{eff2}} + \mu_2 - \mu_3 \right) (R_{eff2} + R_{eff3}) \quad (1.36)$$

$$f_4^* = \mu_2 + \frac{d_2}{R_{eff2}} \quad (1.37)$$

Aşama 3'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü Şekil 1.15'te gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Aşama 3'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Aşama 4: İç kayıcı alt mafsallı kayıcı üzerinde kayar ve üst mafsallı kayıcı üst içbükey plaka üzerinde kayar.

Bu aşamada, alt mafsallı kayıcı, yer değiştirme sınırına ulaşır ve alt içbükey plaka üzerinde daha fazla kayamaz. Bu durum iç kayıcıyı alt mafsallı kayıcı üzerinde kaymaya zorlayarak iç kayıcının eğiminin artmasıyla artan yatay kuvvetin desteklenebilmesini sağlar. Üst mafsallı kayıcı henüz sınıra ulaşmamıştır ve iç kayıcı ile üst mafsallı kayıcı arasında göreceli bir kayma meydana gelmez.

Bu aşamada omurga eğrisinin normalleştirilmiş rijitliği aşağıdaki gibi elde edilir:

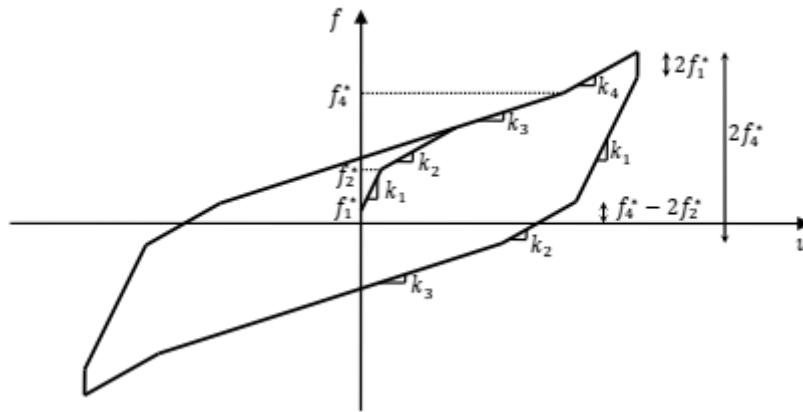
$$k_4 = \frac{1}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (1.38)$$

Bu aşamanın en büyük yer değiştirme ve normalleştirilmiş kuvveti:

$$u_5^* = u_4^* + \left(\frac{d_3}{R_{eff3}} + \mu_3 - \frac{d_2}{R_{eff2}} - \mu_2 \right) (R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (1.39)$$

$$f_5^* = \mu_3 + \frac{d_3}{R_{eff3}} \quad (1.40)$$

Aşama 4'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü Şekil 1.16'da gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Aşama 4'ün kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Aşama 5: İç kayıcı, iki mafsallı kayıcı arasında kayar.

Bu aşamada, üst mafsallı kayıcı, yer değiştirme sınırına ulaşır ve üst içbükey plaka üzerinde daha fazla ilerleyemez. Sonuç olarak, iç kayıcı, yatay kuvvetin artmasını desteklemek için

artan bir eğim sağlayarak üst mafsallı kayıcı üzerinde kaymaya zorlanır. İç kayıcı, mafsallı kayıcıların yerdeğiştirme sınırına temas ettiğinde, izolatör yerdeğiştirme sınırına ulaşır ve hasar görmeden daha ileri gidemez.

Bu aşamada omurga eğrisinin normalleştirilmiş rijitliği aşağıdaki gibi elde edilir:

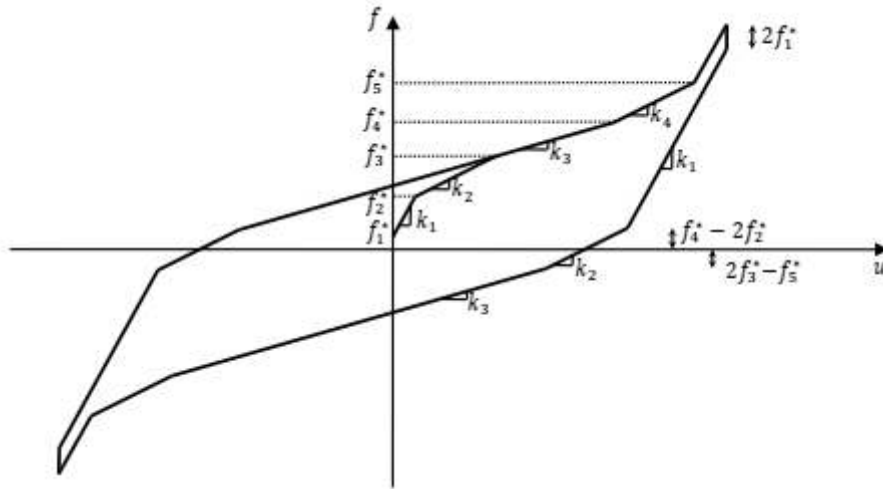
$$k_5 = \frac{1}{2R_{eff1}} \quad (1.41)$$

Bu aşamanın en büyük yer değıştirme ve normalleştirilmiş kuvveti:

$$u_6^* = d_1 + d_2 + d_3 + \frac{R_{eff1}}{R_{eff3}} d_3 - \frac{R_{eff1}}{R_{eff2}} d_2 \quad (1.42)$$

$$f_6^* = f_5^* + k_5 (u_6^* - u_5^*) \quad (1.43)$$

Aşama 5'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü Şekil 1.18'de gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Aşama 5'in kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

1.3. Rayleigh Sönüm

Tüm yapılar dinamik yüklere maruz kaldığında yapısal elemanların ve/veya yapısal olmayan bileşenlerin deformasyonları nedeniyle enerji kaybı sergiler. Elastik sönüm, yani yapısal elemanlar makroskopik ölçekte elastik olmayan tepki göstermeden önce doğal sönümlenme olarak adlandırılan bu enerji kaybı, yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki malzemelerin iç sürtünme gibi çeşitli mekanizmalardan ve viskoz özelliklerinden kaynaklanır (Salehi ve Sideris, 2020). Bağlantılardaki sürtünme (örneğin, çelik bağlantılarda veya yapısal ve yapısal olmayan bileşenler arasında), mikro çatlakların açılıp kapanması (örneğin beton elemanlarda) ve bazen yapıyı destekleyen toprak ortamına enerji yayılımı (toprak açıkça simüle edilmediğinde) (Priestley ve Grant, 2005) (Charney, 2008) (Chopra ve McKenna, 2016) bu mekanizmalara örnek olarak verilebilir.

Elastik olmayan sönüm ise, genellikle histeretik sönümlenme olarak adlandırılan ek enerji kaybı, yapısal elemanların ve malzemelerin elastik olmayan tepkilerinden kaynaklanır. Histeretik sönümlenme günümüzde yapısal simülasyon modellerinde sırasıyla yapısal malzemeler ve elemanlar için doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri aracılığıyla doğrudan açıklanabilse de, kaynak mekanizmalarının karmaşıklığı ve sınırlı anlaşılması nedeniyle içsel sönümlenme genellikle Rayleigh sönümlenme modeli olarak adlandırılan basitleştirilmiş eşdeğer doğrusal viskoz model aracılığıyla bütünsel bir şekilde temsil edilir. Başlangıçta Lord Rayleigh (Rayleigh, 1898) tarafından önerilen ve daha sonra fiziksel doğruluğu yerine matematiksel kolaylığı için yaygın olarak benimsenen Rayleigh sönümlenme modeli, sönümlenme kuvvetlerini, kütle ve rijitlik matrislerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak elde edilen bir sönüm matrisinin ürünü olarak tanımlar. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan sönüm Rayleigh modeli ile elde edilmektedir. Rayleigh modeli aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Dış yüklere ve zamanla değişen yer ivmesine maruz kalan elastik olmayan bir yapı için hareket denklemleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$[m]\ddot{u}(t) + f_d(\dot{u}(t)) + f_s(\dot{u}(t), u(t)) = -[m][r]\ddot{u}_g(t) + p_0(t) \quad (1.44)$$

burada $[m]$ = kütle matrisi; $\ddot{u}$ = bağıl ivme vektörü (temele göre); $\dot{u}$ = bağıl hız vektörü; u = göreceli yer değiştirmelerin vektörü; $\ddot{u}_g$ = üç kartezyen yöndeki yer ivme vektörü;

$[r] = N \times 3$ olmak üzere uygulanan her bir serbestlik derecesini yer hareketiyle etkinleştiren bir matristir ve $p_0(t)$ = yerçekimi yükleri gibi sabit statik yükler dahil olmak üzere harici olarak uygulanan yük vektörüdür. Ayrıca, f_s , genellikle u ve $\dot{u}$ 'in doğrusal olmayan bir fonksiyonu olan geri yükleme kuvvet vektörüdür (örneğin, malzeme şekil değiştirme hızı etkileri hesaba katıldığında) ve f_d , genellikle aşağıdaki gibi verilen (doğal) sönüm kuvvet vektörüdür (viskoz bir model).

$$f_d = [c]\dot{u} \quad (1.45)$$

burada $[c]$ = sönümleme matrisi, seçilen (doğal) sönümleme modeline bağlı olarak farklı biçimler alır. Rayleigh sönümleme modeli, aşağıdaki gibi tanımlanan sönümleme matrisi $[c]$ ile doğrusal bir viskoz sönümleme modelidir:

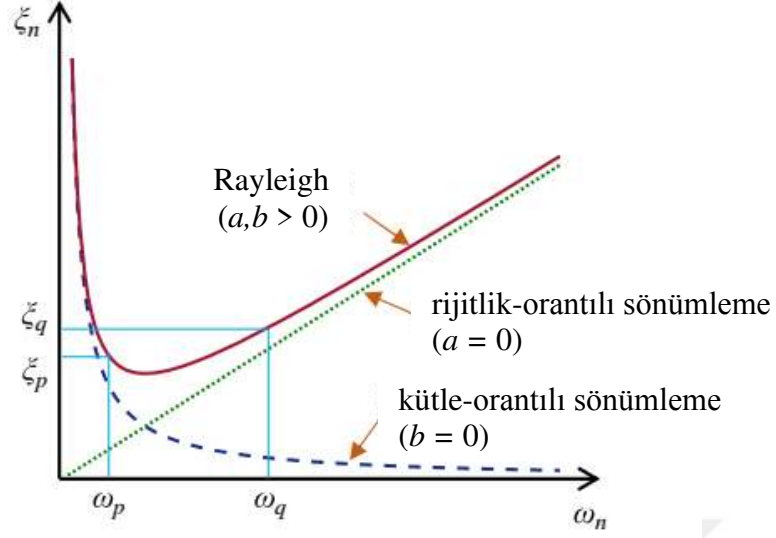
$$[c] = a[m] + b[k] \quad (1.46)$$

burada $[k]$ = tüm sistemin rijitlik matrisi; ve a ve b ise iki negatif olmayan orantılılık katsayısıdır. Denklem (1.46) 'yi Denklem (1.44)' de yazarak ve ardından hareket denklemini modal koordinatlar cinsinden ifade etmek için modal ayrıştırma uygulayarak, n'inci mod sönümleme oranı, ξ_n , ile n'inci mod dairesel frekans, ω_n , arasında aşağıdaki ilişki elde edilir (Chopra, 1995):

$$\xi_n = \left(\frac{1}{2\omega_n} \right) a + \left(\frac{\omega_n}{2} \right) b \quad (1.47)$$

Böylece, orantılılık katsayıları p'inci ve q'inci modların sönüm oranlarını belirleyerek iki bilinmeyenli iki denklemin çözümünden elde edilebilir:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_p & \omega_p \\ 1/\omega_q & \omega_q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_p \\ \xi_q \end{Bmatrix} \quad (1.48)$$



Şekil 1.18. Rayleigh sönüm modelinde frekans ve sönümlleme oranı ilişkisi.

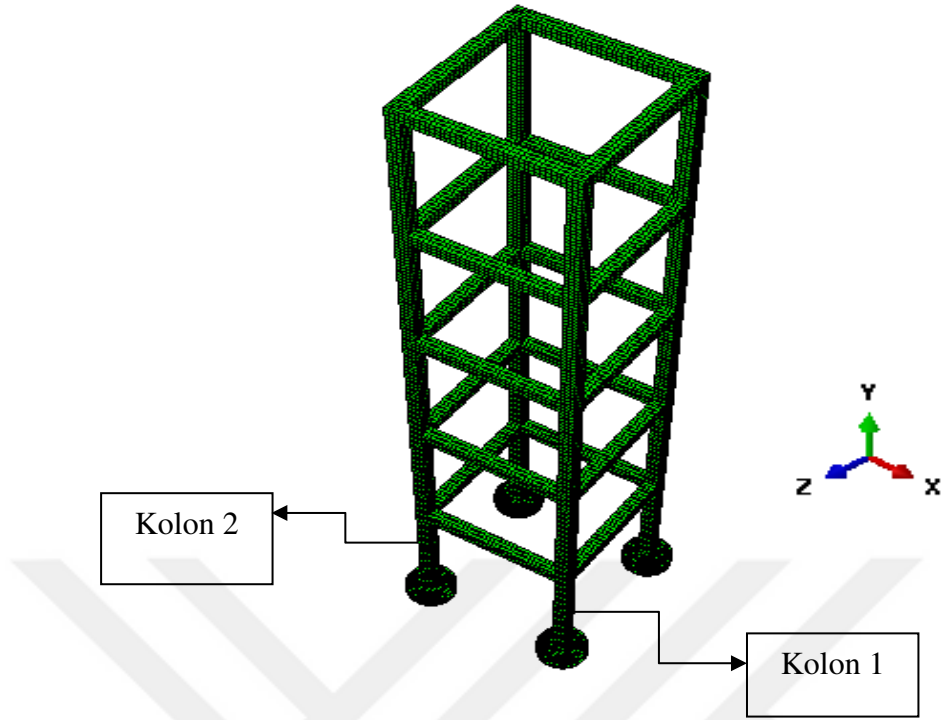
burada ω_p ve ω_q sırasıyla p'inci ve q'inci modların dairesel frekanslarıdır. Rayleigh sönümlleme modeli ($a > 0, b > 0$) için sönüm oranının modal frekans ile değişimi ve iki özel durumu, rijitlik-orantılı sönümlleme ($a = 0, b > 0$) ve kütle-orantılı sönümlleme ($a > 0, b = 0$) olarak Şekil. 1.18.'de gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, rijitlik-orantılı sönümlleme modeli, doğal frekansa göre sönüm oranında doğrusal bir artış gösterir. Bu model yüksek frekanslarda yüksek sönüm oranları üretirken, kütle-orantılı sönümlleme modeli, düşük doğal frekanslarda aşırı yüksek sönüm oranları üretir ve daha yüksek doğal frekanslarda sönüm oranları düşer (Hall, 2018).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenen sismik izolasyonlu betonarme yapıların zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Ankastre mesnetli, tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç, çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörlü yapıların deprem yer hareketine verdikleri tepkiler en büyük yerdeğiştirme, katlar arası ötelenme oranı, en büyük kat ivmesi ve taban kesme kuvveti olarak dikkate alınmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca üç eğrilikli sarkaç izolatör için farklı sürtünme katsayıları ve farklı sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçapları dikkate alınarak sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir.

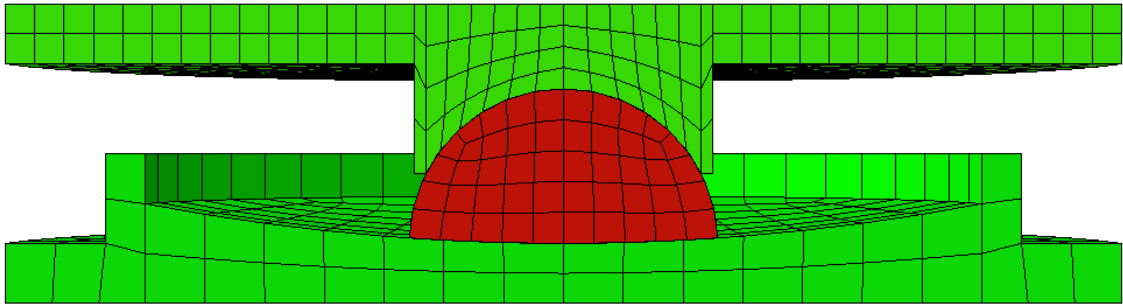
2.1. Yapı ve İzolatör Modelleri

Bu tez çalışmasında Şekil 2.1'deki 5 katlı basit bir yapı modeli dikkate alınmıştır. Yapı ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çözüm için harcanan zamanı azaltabilmek için altı yüzlü (hexahedral), sürekli, üç boyutlu, 8 noktalı, 1 integrasyon noktalı (reduced integration) C3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır (ABAQUS, 2014). Kabul edilebilir, güvenilir sonuçlar ve hesaplama süresi dikkate alınarak ağ boyutu oluşturulmuştur. Yapı kolon ve kirişleri 30 x 30 cm enkesit boyutlarına sahiptir. Kolonlar arası mesafe ve kat yüksekliği 3.5 m'dir. Beton malzemesi için elastisite modülü 20 GPa, Poisson oranı 0.18 ve özgül ağırlığı 24 kN/m³ olarak dikkate alınmıştır. X doğrultusunda dikkate alınan deprem yer hareketlerinin kolonlar üzerindeki etkisini incelemek için Şekil 2.1'deki Kolon 1 ve Kolon 2 seçilmiştir.

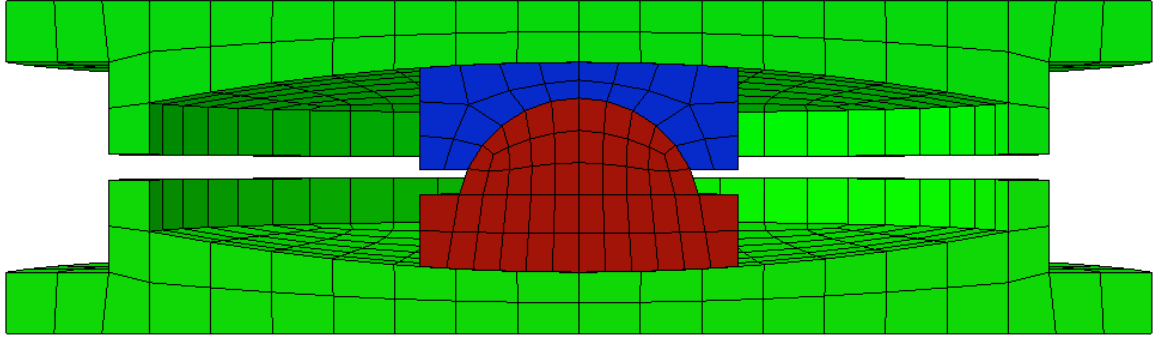


Şekil 2.1. Yapının üç boyutlu modeli

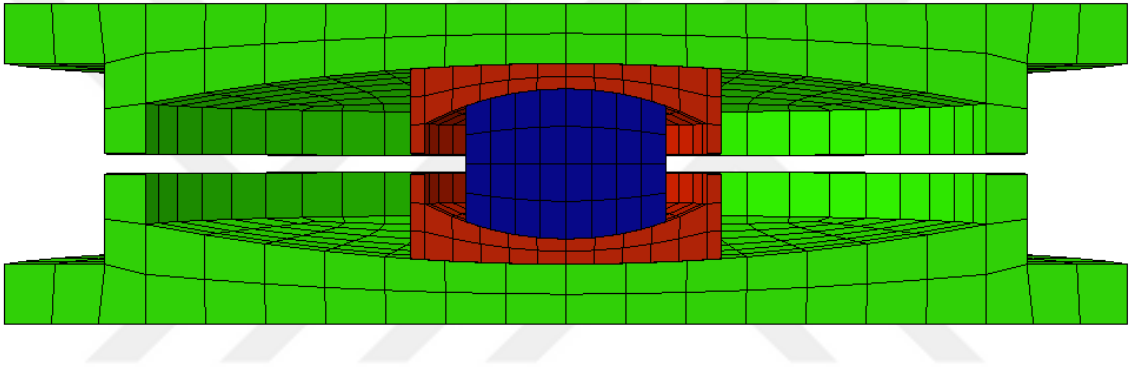
Yapının sismik izolasyonu için üç tip sürtünmeli sarkaç izolatör: tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör (TESS), çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör (ÇESS) ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör (ÜESS) dikkate alınmıştır. Dikkate alınan izolatör modelleri Şekil 2.2-2.4’de gösterilmektedir. İzolatörler için kullanılan malzeme, maksimum çekme dayanımı 490 MPa ve akma dayanımı 355 MPa olan çelik S355'tir. Çelik malzemesinin elastisite modülü 210 GPa ve Poisson oranı 0.3 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2 2. TESS izolatör sonlu eleman modeli

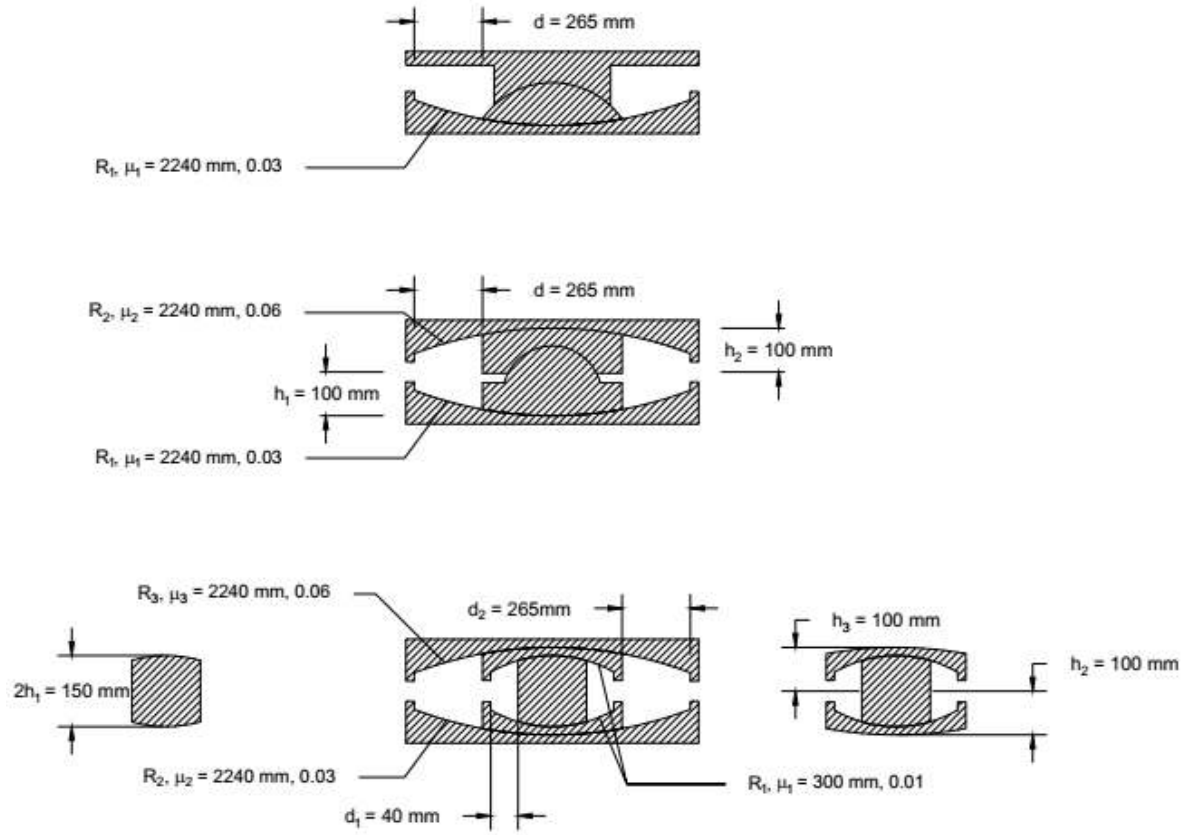


Şekil 2.3. ÇESS izolatör sonlu eleman modeli



Şekil 2.4. ÜESS izolatör sonlu eleman modeli

Farklı sürtünme yüzeyli izolatörler için bu çalışmada dikkate alınan eğrilik yarıçapları ve sürtünme katsayıları gibi geometrik ve malzeme özellikleri Şekil 2.5'te gösterilmektedir (Aguilar vd., 2017).



Şekil 2.5. TESS, ÇESS ve ÜESS izolatör detayları

Bu çalışmanın amaçları doğrultusunda ayrıca, üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörler için farklı sürtünme katsayıları ve sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçapları dikkate alınmıştır. Tablo 2.1 ve 2.2 çalışma kapsamında detaylı olarak incelenen üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörlerin ayrıntılarını verilmektedir.

Tablo 2.1. Sürtünme katsayıları farklı model türleri

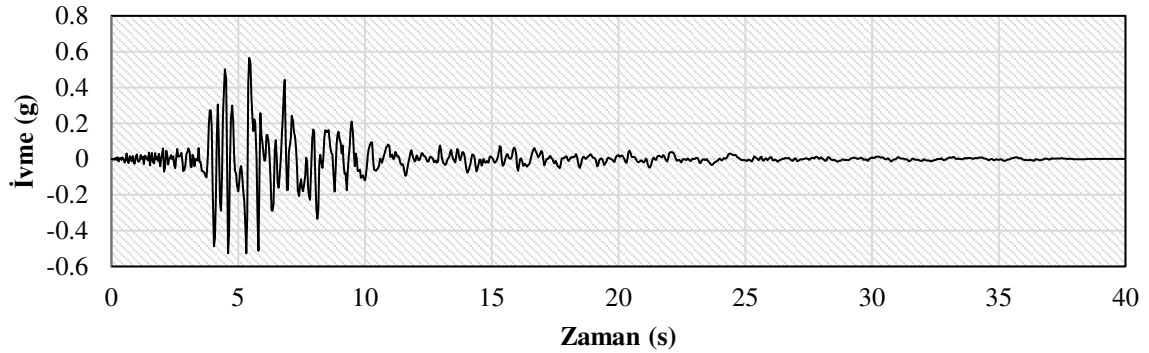
Model Türleri	R_1	R_2	R_3	μ_1	μ_2	μ_3
ÜESS1	300	2240	2240	0.01	0.02	0.03
ÜESS2	300	2240	2240	0.01	0.03	0.06
ÜESS3	300	2240	2240	0.01	0.04	0.08

Tablo 2.2. Sürtünme yüzey eğrilik yarıçapları farklı model türleri

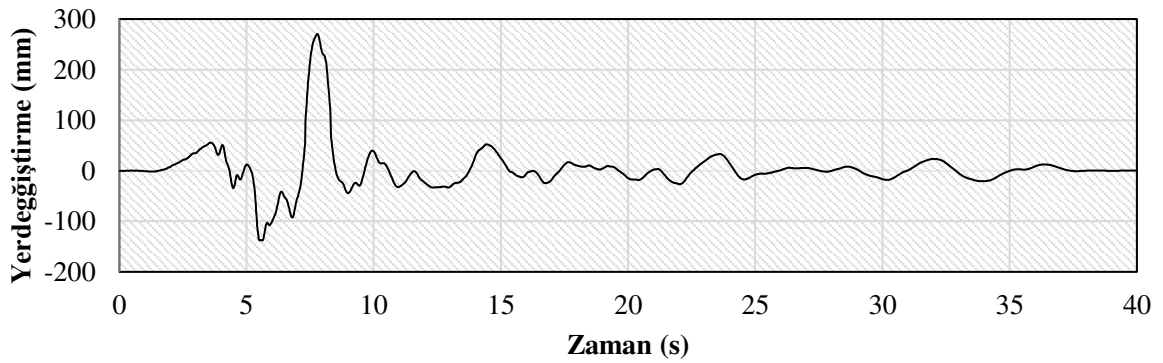
Model Türleri	R_1	R_2	R_3	μ_1	μ_2	μ_3
ÜESS4	300	2000	2000	0.01	0.03	0.06
ÜESS5	300	2240	2240	0.01	0.03	0.06
ÜESS6	300	2480	2480	0.01	0.03	0.06

2.2. Deprem Kaydı

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizlerde kullanılan deprem kaydı Şekil 2.6'da ivme-zaman grafiği ve Şekil 2.7'de yerdeğiştirme-zaman grafiği gösterilen Northridge-01, 1/17/1994, Newhall-Fire Station depremidir. Deprem maksimum yer ivme değeri (PGA) 0.583g'dir. İlgili deprem kaydı PEER NGA deprem yer hareketleri veri tabanından elde edilmiştir. Bu deprem kaydı, özellikle tek sürtünmeli sarkaç olmak üzere, izolatörlerin maksimum deplasman kapasitelerine göre seçilmiştir.



Şekil 2.6. Northridge 1994 depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 2.7. Northridge 1994 depremi yerdeğiştirme-zaman grafiği

2.3. Rayleigh Sönüm Katsayılarının Belirlenmesi

ABAQUS programında malzemenin enerji yayma mekanizmasını yani sönümünü tanımlamak için Rayleigh sönümlemesi kullanılacaktır. Rayleigh sönüm katsayılarının hesaplanabilmesi için yapının açısal doğal frekanslarının hesaplanması gereklidir. Bu amaçla ankastre mesnetli yapının modal analizi gerçekleştirilmiştir. Ankastre mesnetli yapı modeli için elde edilen açısal frekans ve periyot değerleri farklı modlar için Tablo 2.3'te verilmektedir. Ayrıca yapının doğal frekansta titreşirken göstereceği deformasyonları gösteren mod şekilleri ankastre mesnetli yapı modeli için Şekil 2.8'de gösterilmektedir.

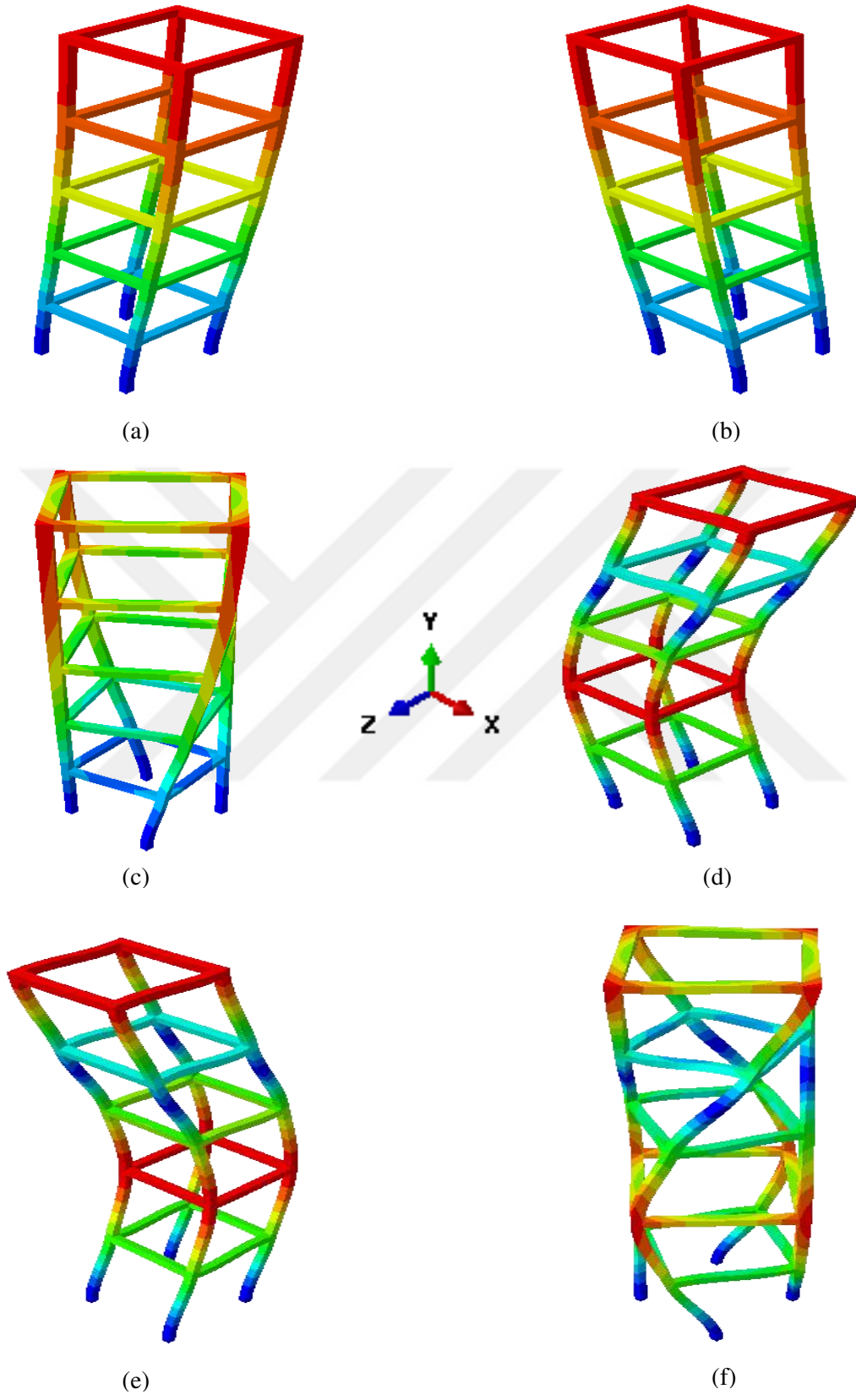
Tablo 2.3. Modal analiz sonuçları

Mod	Açısal Frekans (rad/s)	Periyot (s)	Yön
1. Mod	1.5013	0.6661	X
2. Mod	1.5013	0.6661	Z
3. Mod	2.0041	0.4990	Rotasyon Y
4. Mod	4.7545	0.2103	X
5. Mod	4.7545	0.2103	Z
6. Mod	6.2958	0.1588	Rotasyon Y

Elde edilen modal analiz sonuçlarına göre X doğrultusu için 1. ve 4. modların açısal doğal frekans değerleri Denklem (1.48)'da %5 Rayleigh sönüm oranı için kullanılırsa Rayleigh sönüm katsayıları a ve b aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a = 2\xi \left[\frac{\omega_p \omega_q}{\omega_p + \omega_q} \right] = 2(5\%) \left[\frac{(1.5013)(4.7545)}{1.5013 + 4.7545} \right] = 0.1141$$

$$b = \frac{2\xi}{\omega_p + \omega_q} = \frac{2(5\%)}{1.5013 + 4.7545} = 0.01598$$



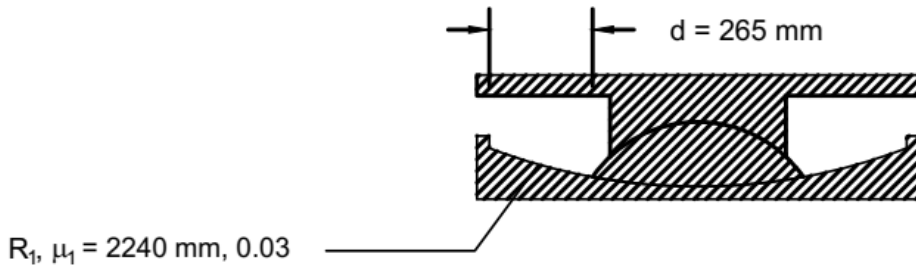
Şekil 2.8. Mod Şekilleri (a) 1. Mod (b) 2. Mod (c) 3. Mod (d) 4. Mod (e) 5. Mod ve (f) 6. Mod

2.4. İzolatör Sonlu Eleman Model Güvenilirliği

TESS, ÇESS ve ÜESS izolatör sonlu eleman modellerinin (SEM) güvenilirliği için analitik formüllerle elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme döngüleri sonlu eleman sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İzolatörler üzerindeki toplam düşey yük 2000 kN olarak dikkate alınmıştır. Bu düşey yük üç boyutlu modellerin üst plaka yüzey alanına düzgün yayılı basınç olarak uygulanmıştır.

2.4.1. TESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği

Dikkate alınan tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Bu izolatörün sürtünme katsayısı 0,03 ve sürtünme yüzeyinin yarıçapı 2.24 m'dir.



Şekil 2.9. Dikkate alınan TESS izolatör detayları

Analitik olarak sıfır yer değiştirme durumunda F_f 'nin değeri Denklem (1.3)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_f = \mu F_n = \mu W = 0.03 \times 2000 = 60 \text{ kN}$$

TESS izolatörünün yatay rijitlik k_b değeri Denklem (1.6)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k_b = \frac{W}{R} = \frac{2000}{2.24} = 892.86 \text{ kN/m}$$

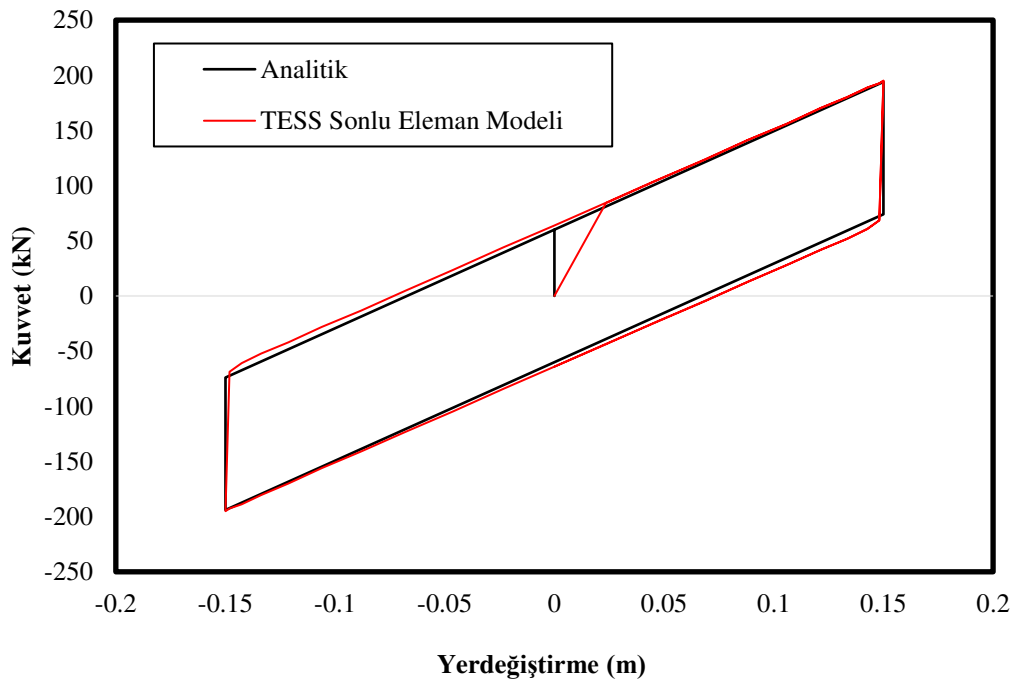
Maksimum 150 mm yatay yer değiştirme kullanarak, Denklem (1.5)'e göre yatay kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W = \frac{2000}{2.24} 0.15 + 0.03 \times 2000 = 193.93 \text{ kN}$$

Aynı durumunda 150 mm'lik yerdeğistirme için şekil 1.6'da gösterildiği gibi, negatif yatay kuvvet değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir :

$$F = 193.93 \text{ kN} - 2\mu W = 193.93 \text{ kN} - 2(0.03 \times 2000) = -73.93 \text{ kN}$$

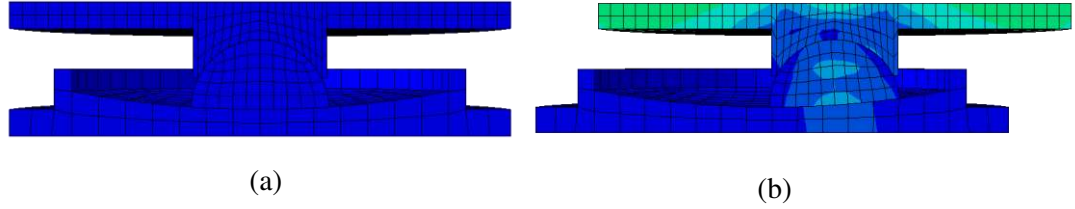
Yukarıdaki tüm analitik hesaplamalardan, tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün kuvvet-yerdeğiştirme grafiği şekil 2.10'daki gibi elde edilmiştir. Ayrıca şekil 2.10'da tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörünün sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



şekil 2.10. TESS izolatörü için kuvvet-yerdeğiştirme karşılaştırması

şekil 2.10da görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar her iki model için de benzerdir. Bu sebeple ihmal edilebilir hata ile mevcut sonlu eleman modellerinin TESS izolatörlü yapıların

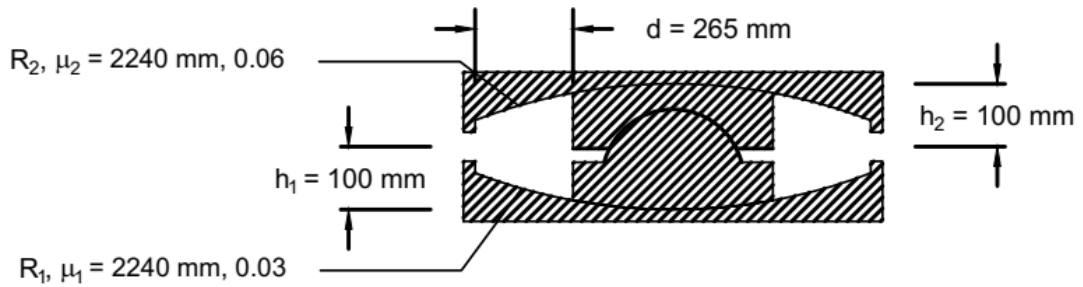
dinamik tepkilerini incelemek için kullanılabileceğini göstermektedir. TESS izolatör için sıfır yerdeğiştirme ve 150 mm yerdeğiştirme durumu Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. TESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme ve (b) 150 mm yerdeğiştirme durumu

2.4.2. ÇESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği

Dikkate alınan çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Bu izolatörün sürtünme katsayısı $\mu_1 = 0.03$ ve $\mu_2 = 0.06$ 'dır. İzolatörün sürtünme yüzeylerinin yarıçapları $R_1 = 2.24$ m ve $R_2 = 2.24$ m'dir.



Şekil 2.12. Dikkate alınan ÇESS izolatör detayları

ÇESS izolatörünün etkili yarıçapı R_{eff} değeri Denklem (1.11) ve Denklem (1.12)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{eff1} = (R_1 - h_1) = (2.24 - 0.1) = 2.14 \text{ m}$$

$$R_{eff2} = (R_2 - h_2) = (2.24 - 0.1) = 2.14 \text{ m}$$

Analitik olarak sıfır yer değiştirme durumunda F_{f1} ve F_{f2} 'nin değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_{f1} = \mu_1 W = 0.03 \times 2000 = 60 \text{ kN}$$

$$F_{f2} = \mu_2 W = 0.06 \times 2000 = 120 \text{ kN}$$

ÇESS izolatörünün yatay rijitlik k_b değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k_{b1} = \frac{W}{R_{eff1}} = \frac{2000}{2.14} = 934.58 \text{ kN/m}$$

$$k_{b2} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} = \frac{2000}{2.14 + 2.14} = 462.29 \text{ kN/m}$$

Denklem (1.22)'e göre u^* yer değiştirmesi aşağıdaki gibi hesaplanır :

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1} = (0.06 - 0.03) 2.14 = 0.0642 \text{ m}$$

Burada μ_e etkin sürtünme katsayısı Denklem (1.23)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} = \frac{0.03(2.14) + 0.06(2.14)}{2.14 + 2.14} = 0.045$$

şekil 1.9'a göre maksimum 150 mm yatay yer değiştirme kullanarak yatay kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F_{0.15m} = F_{f2} + (0.15 - u^*) k_{b2} = 120 + (0.15 - 0.0642) 467.29 = 160.09 \text{ kN}$$

Aynı durumunda 150 mm'lik yerdeğistirme için şekil 1.9'da gösterildiği gibi, negatif yatay kuvvet değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F = F_{0.15m} - 2\mu_1 W = 160.09 \text{ kN} - 2(0.03 \times 2000) = -40.09 \text{ kN}$$

Daha sonra $u = (150 \text{ mm} - 2u^*)$ yerdeğistirme durumunda şekil 1.9'a göre yatay kuvvet değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

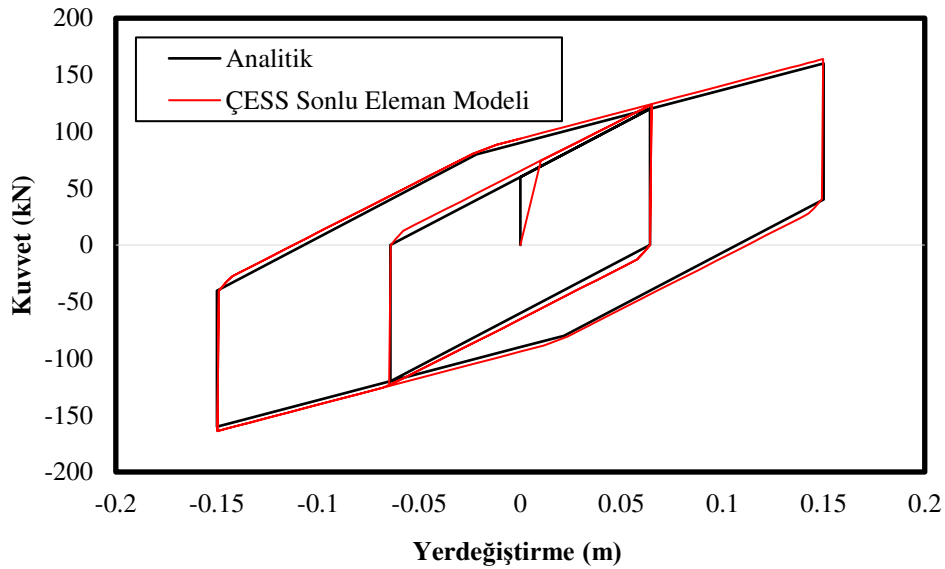
$$u = 0.150 - 2(0.0642) = 0.0216 \text{ m}$$

$$F = -40.09 \text{ kN} - (0.15 - 2u^*)k_{b1} = 40.09 \text{ kN} - (0.15 - 0.0216)934.58 = -79.91 \text{ kN}$$

Sıfır yer değıştirme durumunda yatay kuvvet değeri Şekil 1.9'a göre aşağıdaki gibi hesaplanır :

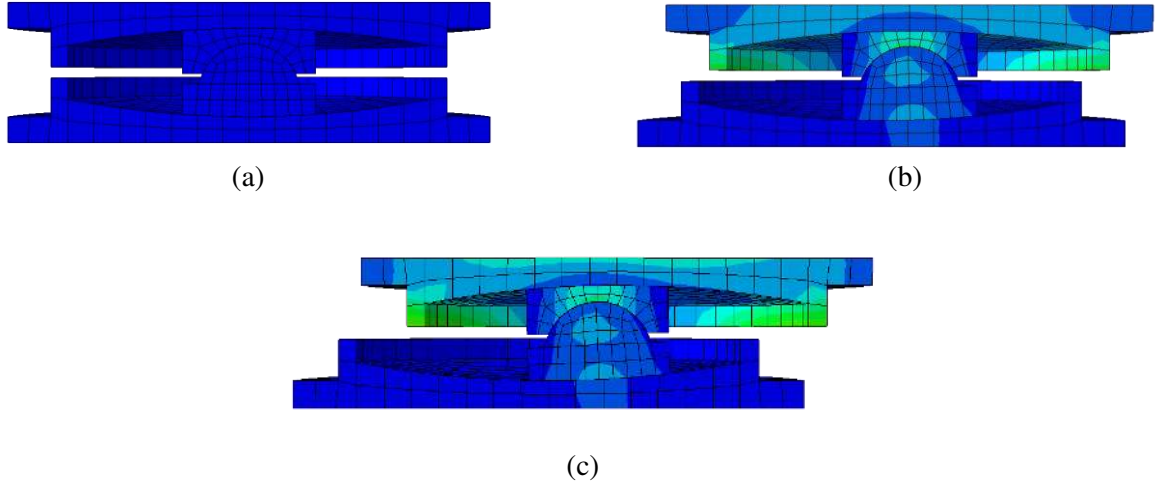
$$F = -\mu_e W = -0.045 \times 2000 = -90 \text{ kN}$$

Yukarıdaki analitik hesaplamalardan, çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün kuvvet-yerdeğıştirme grafiğı Şekil 2.13'teki gibi elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 2.13'te çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörünün sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 2.13. ÇESS izolatör için kuvvet-yerdeğıştirme grafiğı

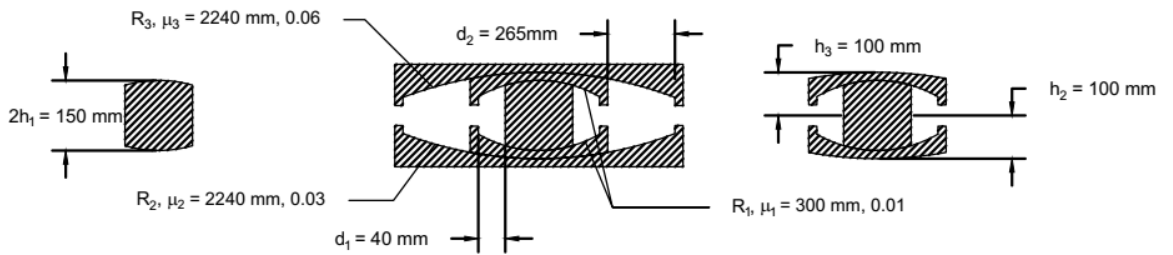
Şekil 2.13'te görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar her iki model için de benzerdir. Bu sebeple ihmal edilebilir hata ile mevcut ÇESS sonlu eleman modellerinin izolasyonlu yapıların dinamik tepkilerini incelemek için kullanılabileceğini göstermektedir. Çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör için sıfır yerdeğıştirme, aşama 1 ve aşama 2 yerdeğıştirme durumları Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.14. ÇESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme (b) aşama 1 ve (c) aşama 2 durumu

2.4.3. ÜESS Sonlu Eleman Model Güvenilirliği

Dikkate alınan üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Bu izolatörün sürtünme katsayıları $\mu_1 = 0.01$, $\mu_2 = 0.03$ ve $\mu_3 = 0.06$ 'dır. İzolatörün sürtünme yüzeylerinin yarıçapları $R_1 = 0.3$ m, $R_2 = 2.24$ m ve $R_3 = 2.24$ m'dir.



Şekil 2.15. Dikkate alınan ÜESS izolatör detayları

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörünün etkili yarıçapı R_{eff} değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{eff1} = (R_1 - h_1) = (0.3 - 0.075) = 0.025 \text{ m}$$

$$R_{eff2} = (R_2 - h_2) = (2.24 - 0.1) = 2.14 \text{ m}$$

$$R_{eff3} = (R_3 - h_3) = (2.24 - 0.1) = 2.14 \text{ m}$$

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör analitik olarak sıfır yer değiştirme ve aşama 1 durumunda yatay kuvvet değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_1^* = \mu_1 W = 0.01 \times 2000 = 20 \text{ kN}$$

$$k_1 = \frac{W}{2R_{eff1}} = \frac{2000}{2(0.025)} = 40000 \text{ kN/m}$$

$$u_2^* = 2R_{eff1}(\mu_2 - \mu_1) = 2 \times 0.025(0.03 - 0.01) = 0.001 \text{ m}$$

$$f_2^* = \mu_2 W = 0.03 \times 2000 = 60 \text{ kN}$$

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör aşama 2 durumunda yatay kuvvet değeri Denklem (1.33), Denklem (1.33) ve Denklem (1.34)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k_2 = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} = \frac{2000}{0.025 + 2.14} = 925.93 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} u_3^* &= R_{eff1}(\mu_2 + \mu_3 - 2\mu_1) + R_{eff2}(\mu_3 - \mu_2) \\ &= 0.025(0.03 + 0.06 - 2(0.01)) + 2.14(0.06 - 0.03) = 0.08 \text{ m} \end{aligned}$$

$$f_3^* = \mu_3 W = 0.06 \times 2000 = 120 \text{ kN}$$

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör aşama 3 durumunda yatay kuvvet değeri Denklem (1.35), Denklem (1.36) ve Denklem (1.37)'ye göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k_3 = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} = \frac{2000}{2.14 + 2.14} = 465.12 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}
u_4^* &= u_3^* + \left(\frac{d_2}{R_{eff2}} + \mu_2 - \mu_3 \right) (R_{eff2} + R_{eff3}) \\
&= 0.08 + \left(\frac{0.265}{2.14} + 0.03 - 0.06 \right) (2.14 + 2.14) = 0.482 \text{ m} \\
f_4^* &= \left(\mu_2 + \frac{d_2}{R_{eff2}} \right) W = \left(0.03 + \frac{0.265}{2.14} \right) 2000 = 307.66 \text{ kN}
\end{aligned}$$

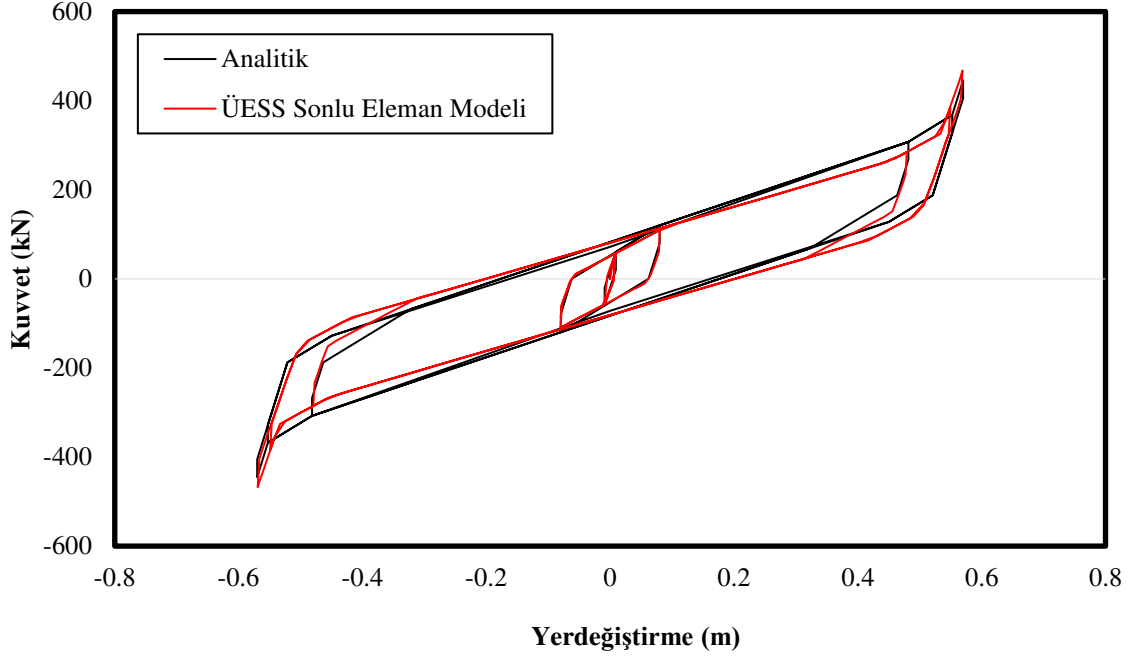
Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör aşama 4 durumunda yatay kuvvet değeri Denklem (1.38), Denklem (1.39) ve Denklem (1.40)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned}
k_4 &= \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} = \frac{2000}{0.225 + 2.14} = 845.67 \text{ kN/m} \\
u_5^* &= u_4^* + \left(\frac{d_3}{R_{eff3}} + \mu_3 - \frac{d_2}{R_{eff2}} - \mu_2 \right) (R_{eff1} + R_{eff3}) \\
&= 0.482 + \left(\frac{0.265}{2.14} + 0.06 - \frac{0.265}{2.14} - 0.03 \right) (0.225 + 2.14) = 0.553 \text{ m} \\
f_5^* &= \left(\mu_3 + \frac{d_3}{R_{eff3}} \right) W = \left(0.06 + \frac{0.265}{2.14} \right) 2000 = 367.66 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör aşama 5 durumunda, analizde kullanılan maksimum yer değiştirme 570 mm'dir, bu nedenle $u_6^* = 0.57 \text{ m}$ 'dir. Yatay kuvvet değeri aşağıdaki gibi hesaplanır :

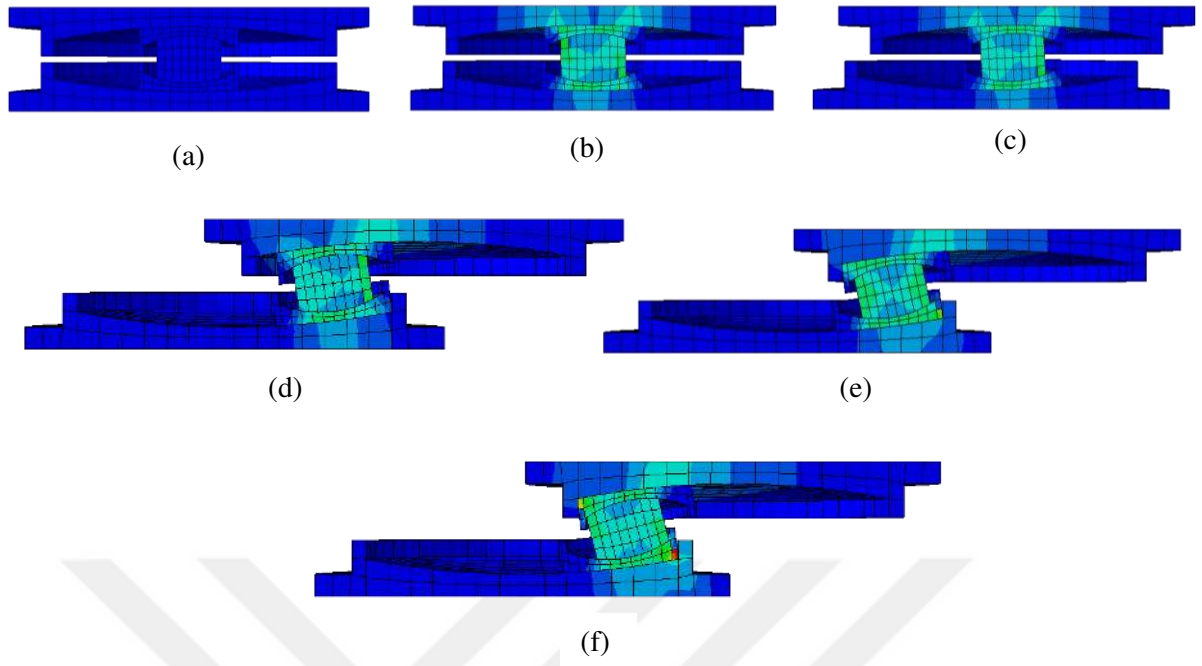
$$\begin{aligned}
k_5 &= k_1 = 4444.44 \text{ kN/m} \\
u_6^* &= 0.57 \text{ m} \\
f_6^* &= f_5^* + k_5 (u_6^* - u_5^*) = 367.66 + 4444.44 (0.57 - 0.553) = 445.44 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Yukarıdaki analitik hesaplamalardan, üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.16'daki gibi elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 2.16'de ÜESS izolatörünün sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 2.16. ÜESS izolatör için kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

Şekil 2.16'da görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar her iki model için de benzerdir. Bu sebeple ihmal edilebilir hata ile mevcut ÜESS sonlu eleman modellerinin izolatörlü yapıların dinamik tepkilerini incelemek için kullanılabileceğini göstermektedir. Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör için sıfır yerdeğiştirme, aşama 1, aşama 2, aşama 3, aşama 4 ve aşama 5 yerdeğiştirme durumları Şekil 2.17'de göstermektedir.



Şekil 2.17. ÜESS izolatör için (a) sıfır yerdeğiştirme (b) Aşama 1 (c) Aşama 2 (d) Aşama 3 (e) Aşama 4 ve (f) Aşama 5 durumu

3. BULGULAR VE İRDELEME

Tek, çift ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaçlar ile sismik izolasyonu yapılmış yapıların ABAQUS programı kullanılarak 1994 Northridge depremi yatay yer hareketi altında zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı sürtünme yüzeyli, sürtünme katsayılı ve eğrilik yarıçaplı izolatörlerin yapıların deprem davranışları üzerindeki etkileri kat yerdeğiştirmesi, katlar arası ötelenme oranı, kat ivmesi ve taban kesme kuvveti açısından karşılaştırılarak incelenmiştir.

Katlar arası ötelenme oranı boyutsuz bir parametredir Şekil 3.1'deki değişkenler ve Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

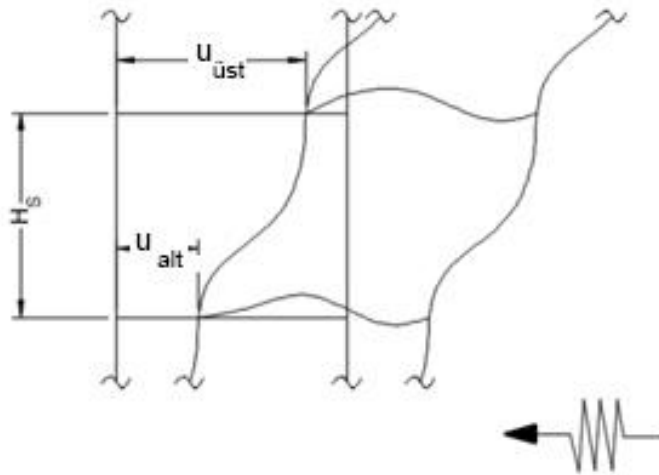
$$d_s = \frac{u_{üst} - u_{alt}}{H_s} \quad (3.1)$$

d_s = katlar arası ötelenme oranı

$u_{üst}$ = üst katın yatay yerdeğiştirmesi

u_{alt} = alt katın yatay yerdeğiştirmesi

H_s = kat yüksekliği



Şekil 3.1. Kat yerdeğiştirmeleri

3.1. Sürtünme Yüzeyi Sayısı Farklı Sarkaç İzolatörlerin Yapı Davranışına Etkileri

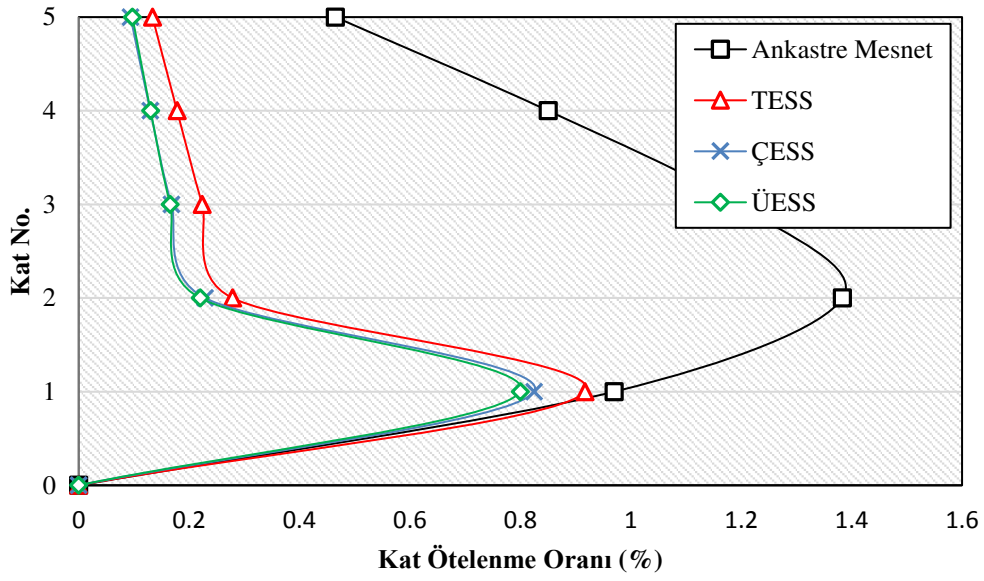
Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip sarkaç izolatörler kullanılarak sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.5 incelendiğinde yapıların katlar arası ötelenme oranlarının, kat yerdeğiştirmelerinin ve kat ivmelerinin ankastre mesnetli yapılara kıyasla azaltılabileceği görülmektedir. ÜESS izolatörlü yapı ankastre mesnetli yapıyla 5. kattaki maksimum katlar arası ötelenme oranı, maksimum yerdeğiştirme ve maksimum ivme açısından karşılaştırıldığında azalma oranları sırasıyla %79.1, %48.2 ve %84.6 olarak elde edilmektedir. ÇESS izolatörlü yapı sistemi ile karşılaştırıldığında bu üç değer sırasıyla %79.8, %46.8 ve %82.4 oranlarına düşmektedir. TESS sistemi için ise bu üç değer sırasıyla %71.3, %36.7 ve %78.6 oranlarına düşmektedir. Bu oranlara göre tüm yapı tepkileri için ÜESS izolatörünün ÇESS izolatörden ve ÇESS izolatörün de TESS izolatörden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

Ankastre mesnetli, TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları

Mesnet Tipi	Katlar Arası Ötelenme Oranları (%)					
	Temel	1. Kat	2. Kat	3. Kat	4. Kat	5. Kat
Ankastre Mesnet	0	0.970	1.383	1.194	0.850	0.465
TESS	0	0.917	0.279	0.224	0.178	0.134
ÇESS	0	0.825	0.229	0.168	0.130	0.094
ÜESS	0	0.800	0.220	0.166	0.130	0.097

Elde edilen sonuçlara göre sürtünmeli sarkaç izolasyon sistemlerinin kullanılması, Northridge depremi altında her katta Ankastre mesnetli sistemin katlar arası ötelenme oranını önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 5. kattaki Ankastre mesnetli sistemin maksimum katlar arası ötelenme oranı %0,465 olarak elde edilirken TESS, ÇESS ve ÜESS sarkaç izolasyonlu sistemlerin maksimum katlar arası ötelenme oranları sırasıyla %0.134, %0.094 ve %0.097 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, ÇESS ve ÜESS izolasyon sistemlerinde yapı üzerindeki kat ötelenme oranı hemen hemen aynı değeri göstermektedir.



Şekil 3.2. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin katlar arası ötelenme oranları

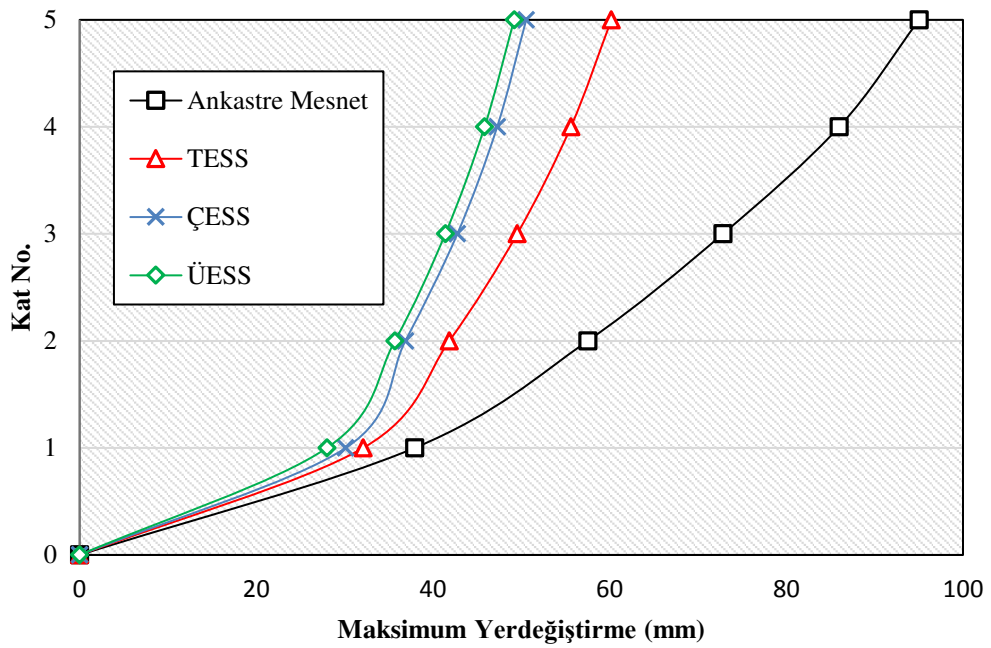
Şekil 3.3 yapının maksimum görelî kat yerdeğıştirmelerindeki değışimi ankastre mesnet, TESS, ÇESS ve ÜESS izolatör mesnet gibi farklı mesnet türleri için göstermektedir. Maksimum görelî yerdeğıştirme, tabana göre her kattaki maksimum yerdeğıştirme değıeridir. Şekilden de görüldüğü gibi, incelenen tüm yapılar söz konusu depremden önemli ölçüde etkilenmiştir. Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanılması, ankastre mesnetli sisteme kıyasla maksimum kat görelî yerdeğıştirmelerini önemli ölçüde azaltmıştır.

Northridge depremi etkisindeki 5 katlı ankastre mesnetli yapı için mevcut yapının 5. kattaki maksimum yerdeğıştirmesi 95.03 mm olarak elde edilirken TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapılar için bu değıerler sırasıyla 60,19 mm, 50,55 mm, 49,18 mm olarak elde edilmiştir. Ankastre mesnetli yapının görelî yerdeğıştirmesindeki azalma oranları sırasıyla %36.7, %46.8 ve %48.2 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu durumda sürtünmeli sarkaç izolasyon sistemlerinin kullanımının ankastre mesnetli yapıya kıyasla maksimum yerdeğıştirmeyi önemli ölçüde azalttığı ortaya çıkmaktadır.

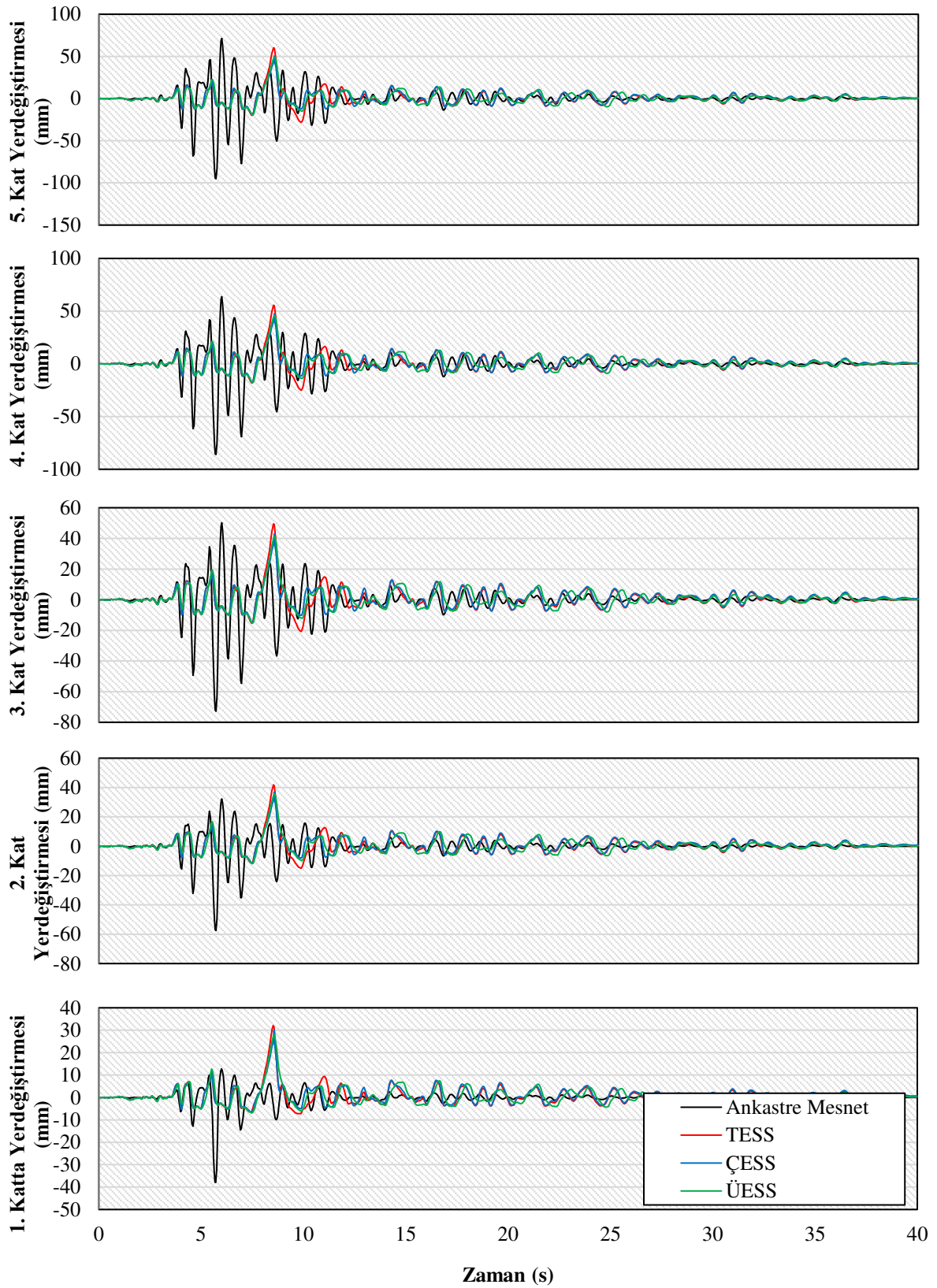
Ankastre mesnetli, TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için her kattaki maksimum görelî yerdeğıştirme değıerleri Tablo 3.2'de verilmektedir. Ayrıca katlardaki görelî yerdeğıştirmelerin zaman ile değışim grafikleri Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için maksimum yerdeğıştirmeler

Mesnet Tipi	Yerdeğıştirme (mm)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0	37.93	57.51	72.82	85.98	95.03
TESS	0	32.10	41.85	49.53	55.61	60.19
ÇESS	0	30.12	36.87	42.75	47.27	50.55
ÜESS	0	27.99	35.69	41.39	45.84	49.18



Şekil 3.3. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğıştirmeleri



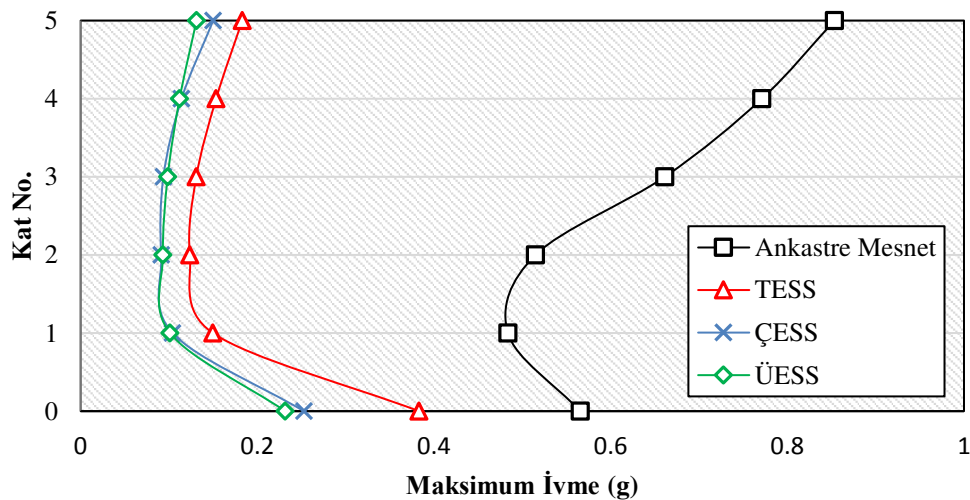
şekil 3.4. Ankastr mesnet ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin kat yerdeğiştirme değerlerinin zaman ile değişimi

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus, deprem sırasında katlarda meydana gelen kat ivme değerleridir. Bu önemlidir çünkü kat ivmesi her kattaki deprem kuvvetini etkileyecektir. İvme ne kadar büyükse, ilgili katta dikkate alınması gereken kuvvet o kadar büyük olacaktır. Northridge depremi etkisindeki ankastre mesnetli beş katlı yapı için Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, mevcut yapının maksimum ivmesi 5. katta 0.853g olarak elde edilirken, diğer TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için yine 5. katta sırasıyla 0.183g, 0.150g ve 0.131g olarak elde edilmiştir. Burada ankastre mesnetli yapının maksimum yer ivmesi 0.583g değerini 0.853g değerine yükseltirken izolatörlü yapı sistemlerinin bu ivmeyi oldukça küçük değerlere indirdiği görülmüştür. 5. kattaki maksimum ivmelerdeki azalma oranları TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için ankastre yapıya kıyasla sırasıyla %78.6, %82.4 ve %84.6 olmuştur.

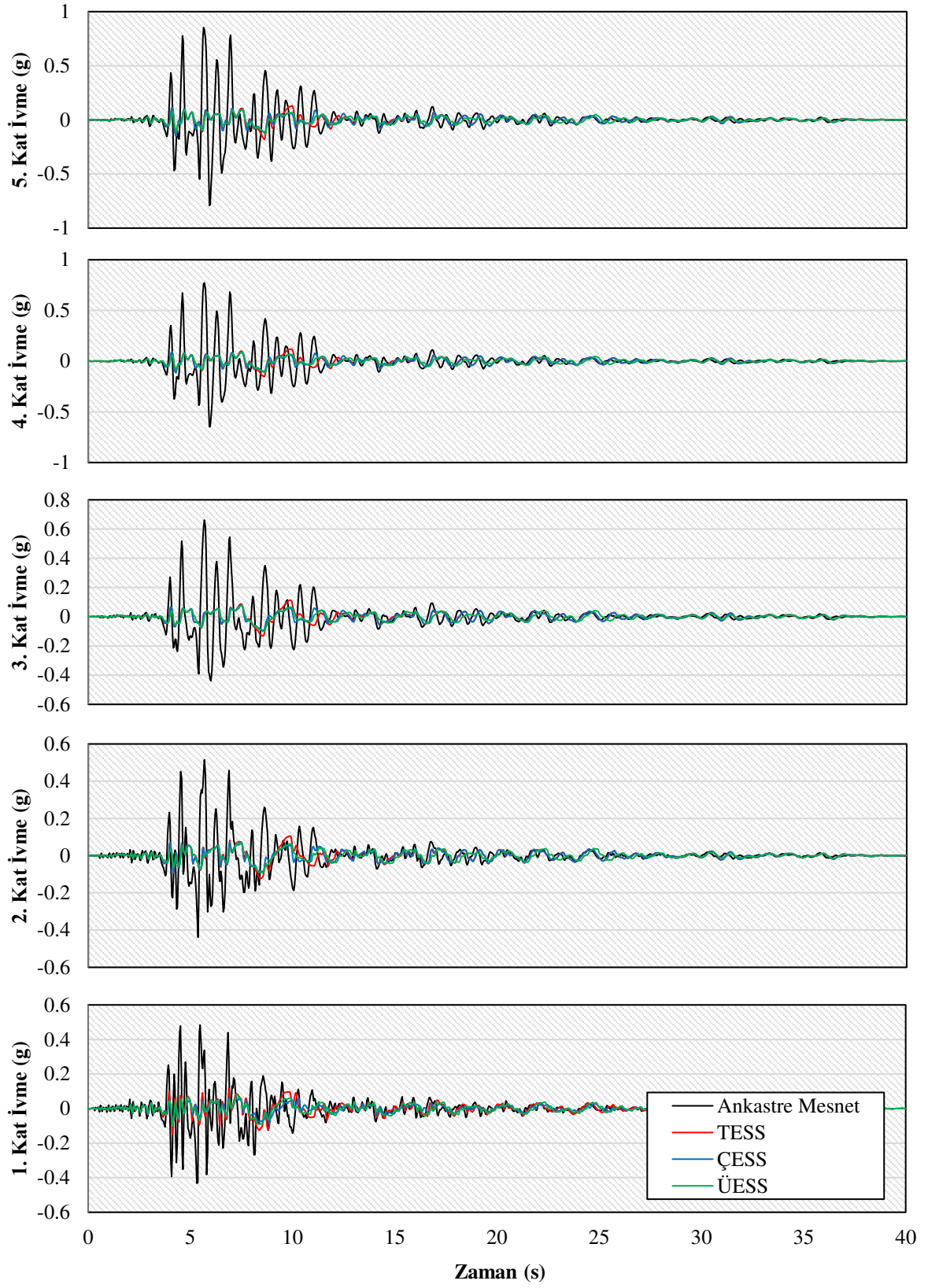
Ankastre mesnetli, TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörlü yapı sistemleri için her kattaki maksimum ivme değerleri Tablo 3.3'te verilmektedir. Ayrıca katlardaki ivmelerin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri

Mesnet Tipi	İvme (g)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0.566	0.484	0.515	0.661	0.771	0.853
TESS	0.383	0.150	0.124	0.131	0.153	0.183
ÇESS	0.253	0.104	0.091	0.094	0.114	0.150
ÜESS	0.232	0.101	0.093	0.099	0.112	0.131



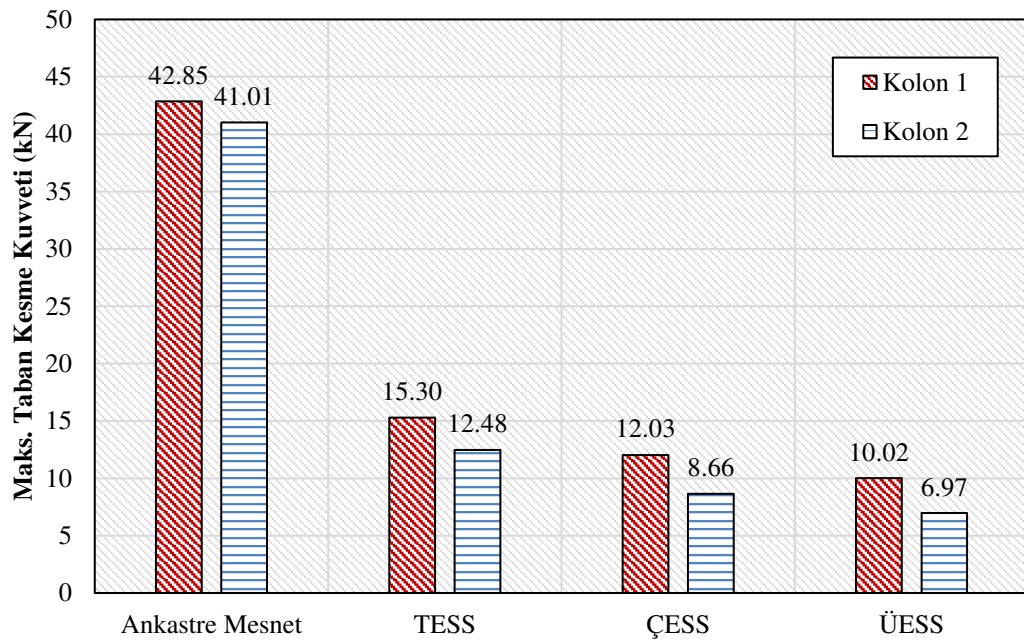
Şekil 3.5. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri



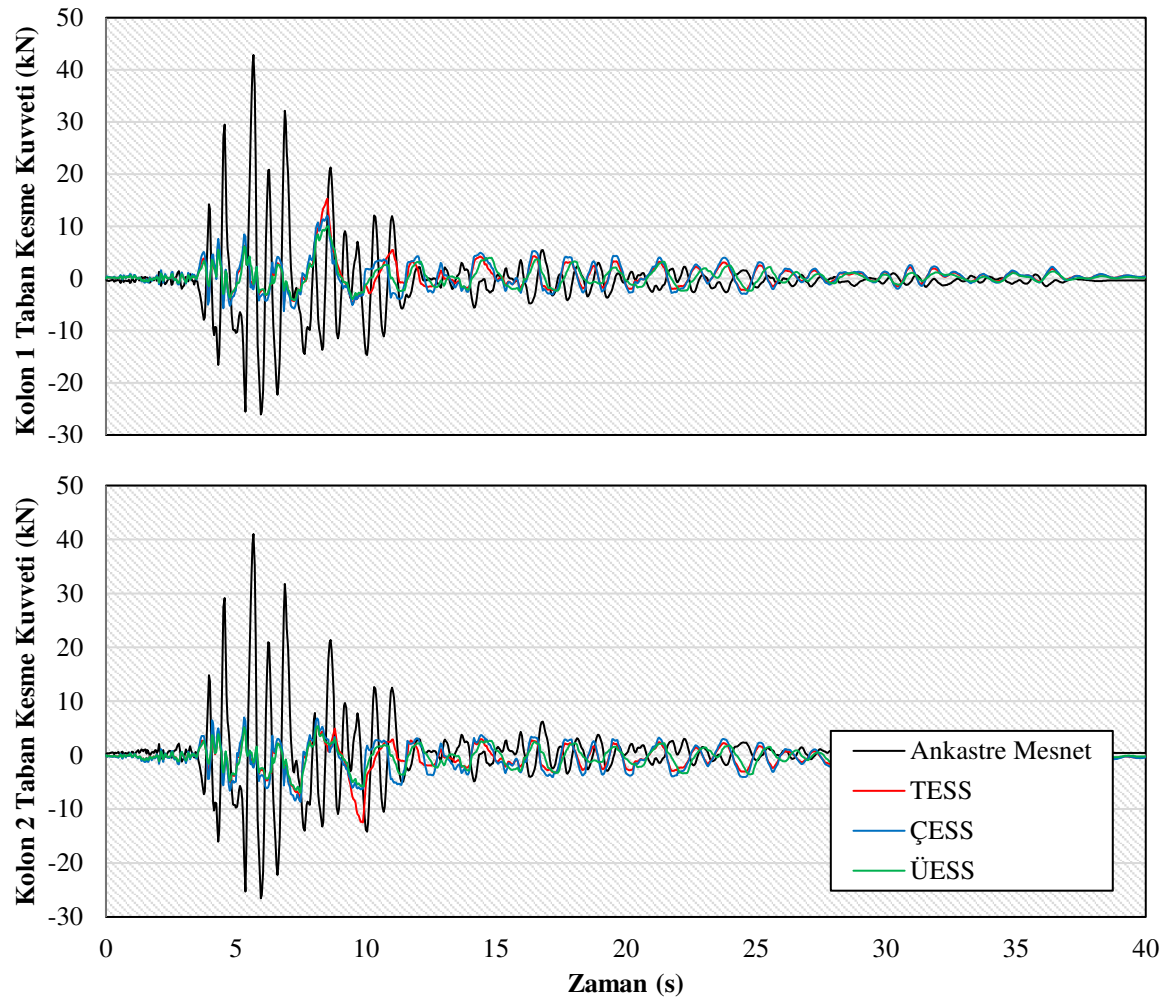
Şekil 3.6. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi

Bir yapının tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli kuvvet de taban kesme kuvvetidir. Yüksek taban kesme kuvveti yapılarda gevrek hasarlara neden olmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde sürtünmeli sarkaç izolatörlerin taban kesme kuvvetini azaltarak yapının dinamik davranışı üzerinde önemli iyileşmelere sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.7 Northridge depremi etkisindeki ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapılar için Kolon 1 ve Kolon 2’de oluşan maksimum taban kesme kuvvetlerini göstermektedir. Ankastre mesnetli sistemin maksimum taban kesmesi 1. kolonda 42.85 kN ve 2. kolonda 41.01 kN iken sürtünmeli sarkaç izolasyonunun uygulandığı sistemlerinin maksimum taban kesme kuvvetleri TESS, ÇESS ve ÜESS izolatörleri için sırasıyla kolon 1’de 15.30 kN, 12.03 kN ve 10.02 kN olarak elde edilmiştir. Kolon 2 için ise sırasıyla elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri 12.48 kN, 8.66 kN ve 6.97 kN’dur. Bu değerlere göre farklı sürtünmeli sarkaç izolasyon sistemlerinin kullanıldığı yapılarda oluşan maksimum taban kesme taleplerinin ankastre mesnetli sisteme göre önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmüştür.

Ayrıca 1. ve 2. kolonlarda oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.8’de gösterilmektedir.

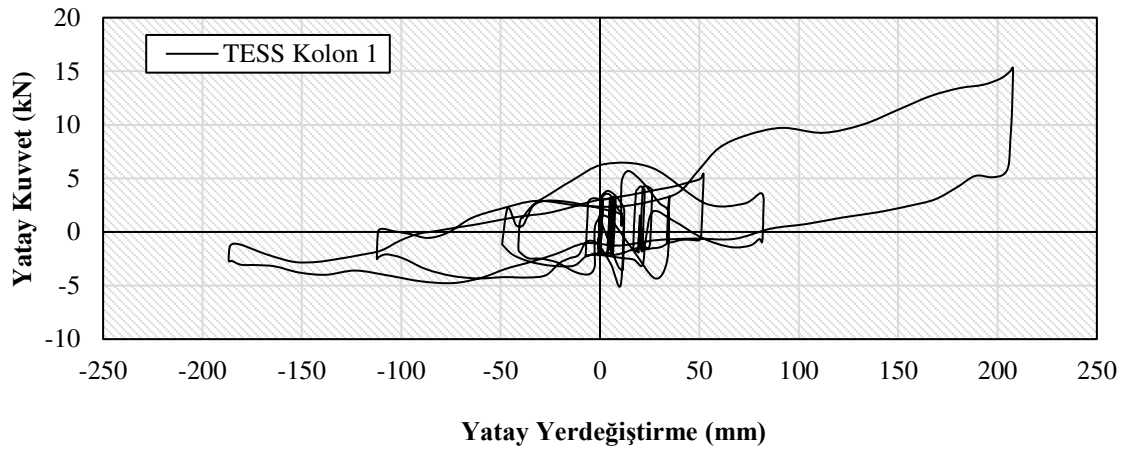


Şekil 3.7. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapılar için kolon maksimum taban kesme kuvvetleri

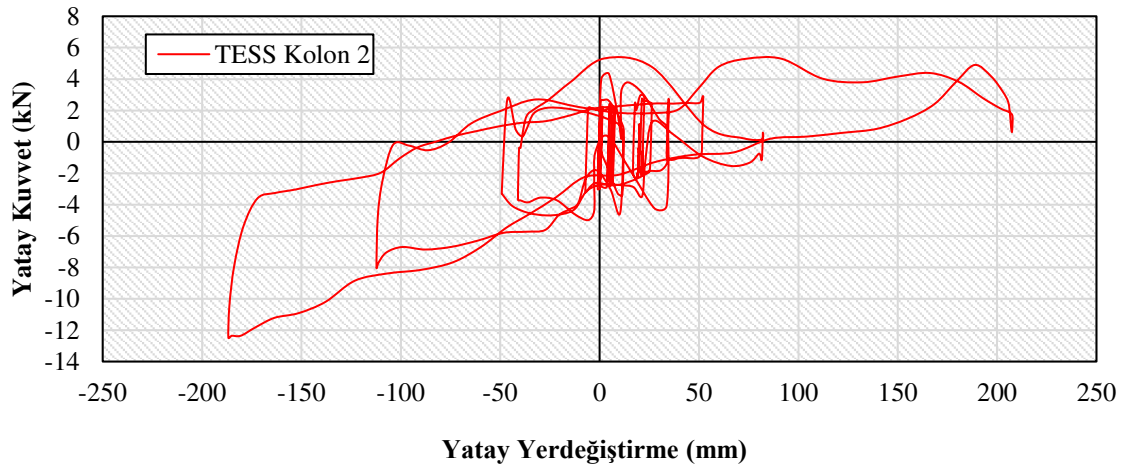


Şekil 3.8. Ankastre mesnetli ve TESS, ÇESS, ÜESS izolatörlü yapılar için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 sırasıyla Kolon 1 ve Kolon 2 altındaki TESS izolatörlerinde deprem süresince oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. Kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri döngü başına enerji kaybını ve yüzeyler tarafından sağlanan etkili sönümlemeyi belirlemek için kullanılabilir. Şekil 3.9 incelendiğinde TESS'de oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin 207,75 mm olduğu görülmektedir. 1. kolon tabanında maksimum 207.75 mm yatay yerdeğiştirme oluştuğunda kolon tabanında 15.30 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır. Benzer şekilde Şekil 3.10 incelendiğinde TESS'de oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin -186.78 mm olduğu görülmektedir. 2. kolon tabanında bu maksimum yatay yerdeğiştirme oluştuğunda kolon tabanında -12.48 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır. Kolonlarda oluşan yatay kesme kuvvetlerinin farklı olmasının nedeni deprem sırasında kolonlar üzerinde oluşan farklı düşey kuvvetlerdir.

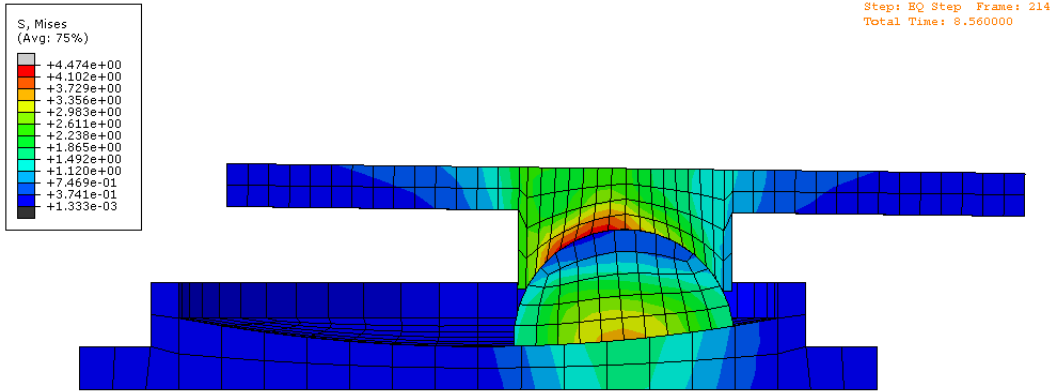


şekil 3.9. Kolon 1 altındaki TESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeşistirme



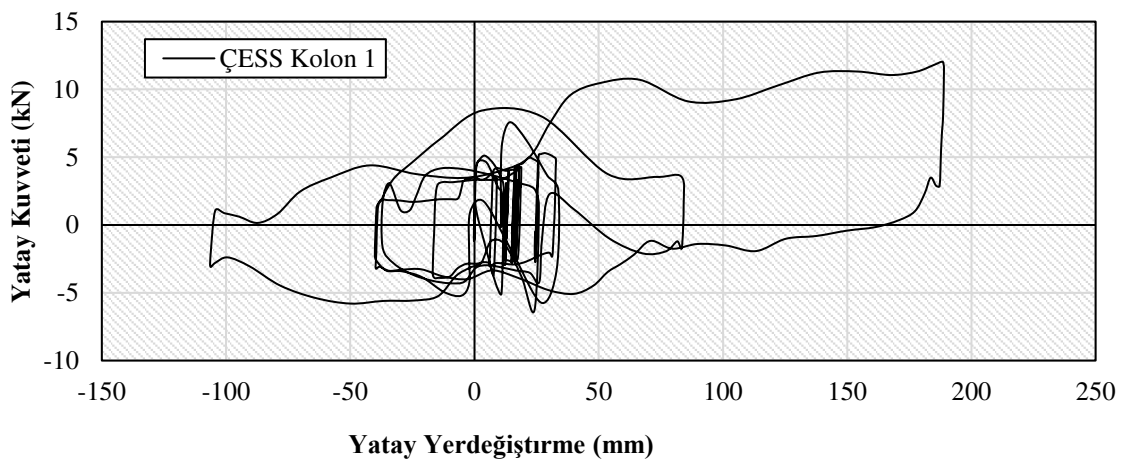
şekil 3.10. Kolon 2 altındaki TESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeşistirme

şekil 3.11 Kolon 1 altındaki TESS izolatörünün 207,75 mm maksimum yerdeşistirme yaptığı durumda enkesitinde oluşan gerilme durumunu göstermektedir. şekilde gösterilen Von Mises gerilmesi izolatörün herhangi bir yükleme durumunda plastik şekil değişimine uğramış olup olmadığını belirlemek için hesaplanan bir gerilme türüdür. Ancak bu çalışma kapsamında dikkate alınan yüklemelerin plastik şekil değişirmeye sebep olmadığı görölmüştür.

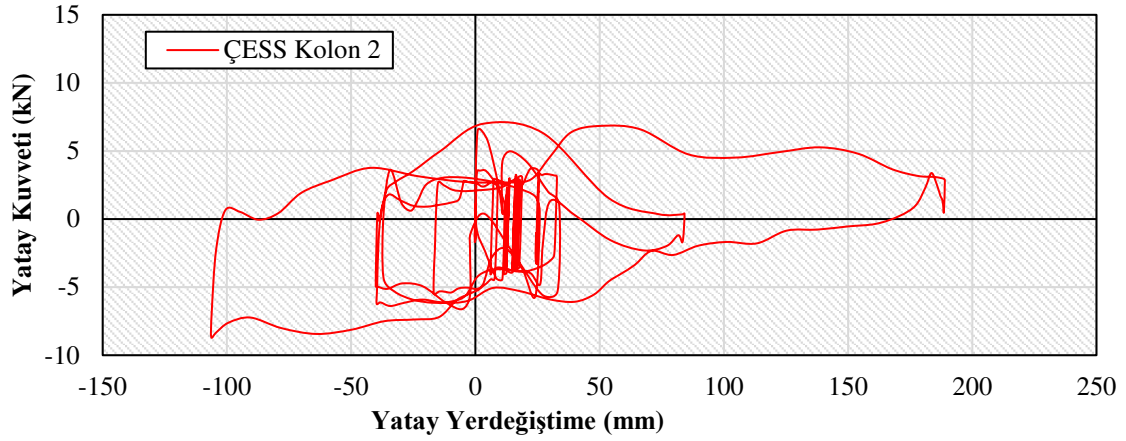


Şekil 3.11. Kolon 1 altındaki TESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 sırasıyla Kolon 1 ve Kolon 2 altındaki ÇESS izolatörlerinde deprem etkisinde oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. 1. kolon tabanındaki ÇESS izolatörde 188,97 mm maksimum yatay yerdeğiştirme oluştuğunda kolon tabanında 12.03 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır. Benzer şekilde 2. kolon tabanındaki ÇESS izolatörde maksimum yatay yerdeğiştirmenin 188.97 mm olduğu görülmüştür. Bu durumda 2. Kolon tabanında 2.96 kN yatay kesme kuvveti oluşmuştur. İzolatörün ters yönde yapmış olduğu maksimum -106.32 mm'lik yatay yerdeğiştirme durumunda oluşan maksimum kesme kuvveti -8.66 kN olarak elde edilmiştir.

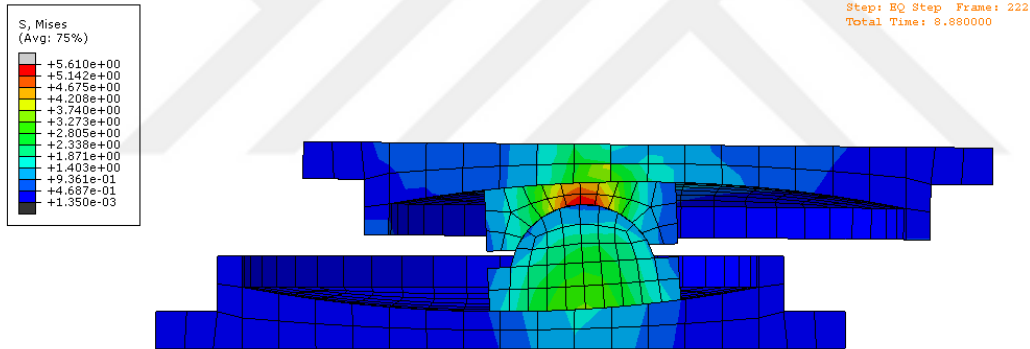


Şekil 3.12. Kolon 1 altındaki ÇESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme



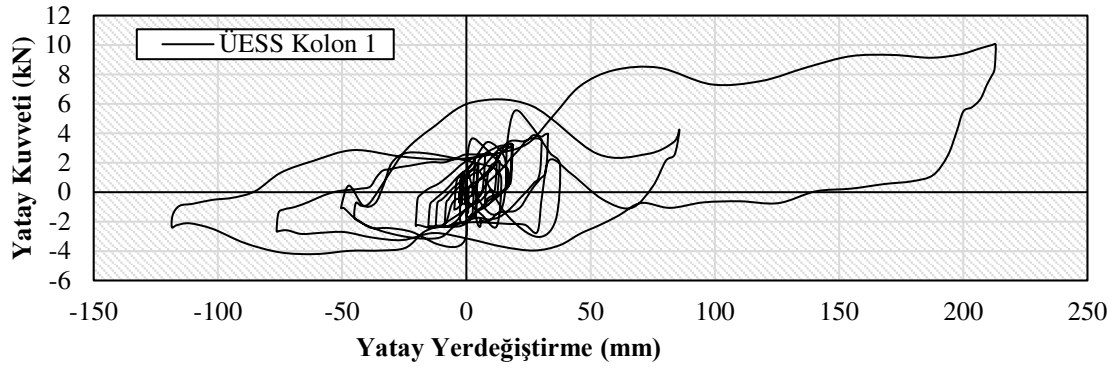
Şekil 3.13. Kolon 2 altındaki ÇESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme

Şekil 3.14 Kolon 1 altındaki ÇESS izolatörünün 188,97 mm maksimum yerdeğiştirme yaptığı durumda enkesitinde oluşan gerilme durumunu göstermektedir.

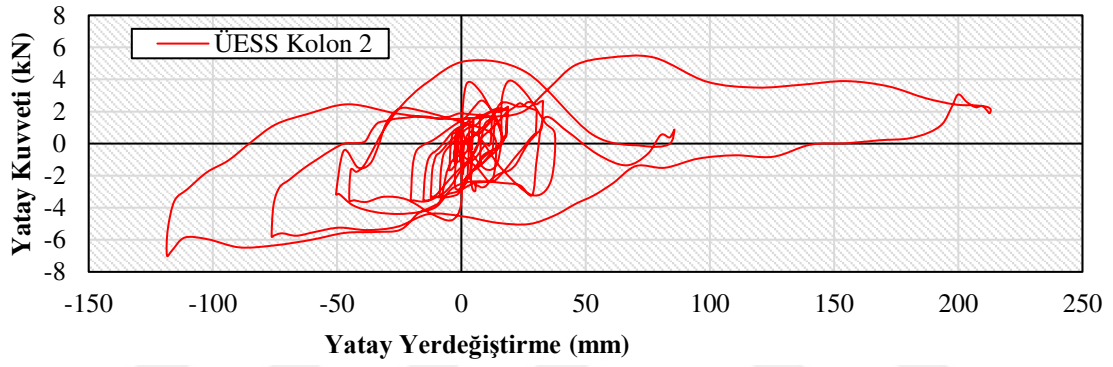


Şekil 3.14. Kolon 1 altındaki ÇESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu

Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 sırasıyla Kolon 1 ve Kolon 2 altındaki ÜESS izolatörlerinde deprem etkisinde oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. ÜESS izolatöründe oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin 213,05 mm olduğu durumda 1. kolon tabanında 10.02 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır. Benzer şekilde 2. kolon altındaki ÜESS izolatöründe oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin 213.05 mm olduğu durumda kolon tabanında 2.13 kN yatay kesme kuvveti oluşmuştur. İzolatörün ters yönde yapmış olduğu maksimum -118.51 mm'lik yatay yerdeğiştirme yaptığı durumda oluşan maksimum kesme kuvveti -6.97 kN olarak elde edilmiştir.

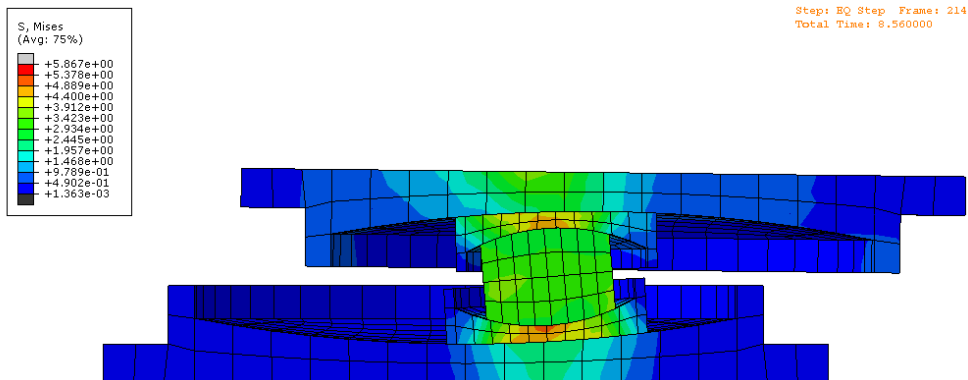


Şekil 3.15. Kolon 1 altındaki ÜESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü



Şekil 3.16. Kolon 2 altındaki ÜESS izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Şekil 3.17 Kolon 1 altındaki ÜESS izolatörünün 213,05 mm maksimum yerdeğiştirme yaptığı durumda enkesitinde oluşan gerilme durumunu göstermektedir.



Şekil 3.17. Kolon 1 altındaki ÜESS izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu

3.2. Yüzey Sürtünme Katsayısının Yapı Davranışına Etkileri

Bu bölümde farklı yüzey sürtünme katsayılı üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılan yapıların katlar arası ötelenme oranları, kat yerdeğiştirmeleri ve kat ivmeleri incelenmektedir. Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.21 incelendiğinde ilk olarak fark edilen durum tüm farklı sürtünme katsayılı izolatör kullanılan yapılardaki ötelenme oranları, kat yerdeğiştirmeleri ve kat ivmeleri değerlerinin ankastre mesnetli yapılara kıyasla oldukça az olmasıdır.

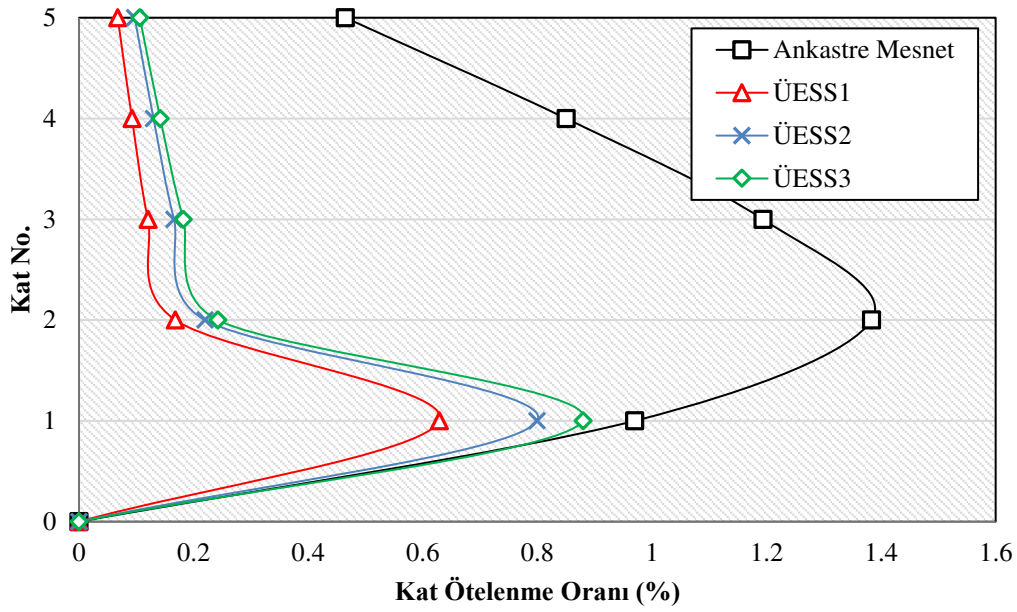
ÜESS1 izolatörlü yapı ankastre mesnetli yapıyla 5. katta oluşan maksimum katlar arası ötelenme oranı, maksimum yerdeğiştirme ve maksimum ivme açısından karşılaştırıldığında bu değerlerdeki azalma oranları sırasıyla %85.5, %60.3 ve %87.9 olarak elde edilmiştir. ÜESS2 izolatörlü yapı sistemi ile karşılaştırıldığında bu üç değer sırasıyla %79.1, %48.2 ve %84.6 oranlarına ve ÜESS3 sistemi ile karşılaştırıldığında ise %77.2,%42.8 ve %83.5 oranlarına düşmüştür. Tüm bu yapı tepkileri için ÜESS1 izolatörü ÜESS2 izolatöründen ve ÜESS2 izolatörü de ÜESS3 izolatöründen daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bir başka ifadeyle artan yüzey sürtünme katsayısı tüm yapı tepkilerini artırmıştır.

Ankastre mesnetli, ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları

Mesnet Tipi	Katlar Arası Ötelenme Oranı (%)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0	0.970	1.383	1.194	0.850	0.465
ÜESS1	0	0.629	0.168	0.120	0.092	0.068
ÜESS2	0	0.800	0.220	0.166	0.130	0.097
ÜESS3	0	0.880	0.242	0.182	0.142	0.106

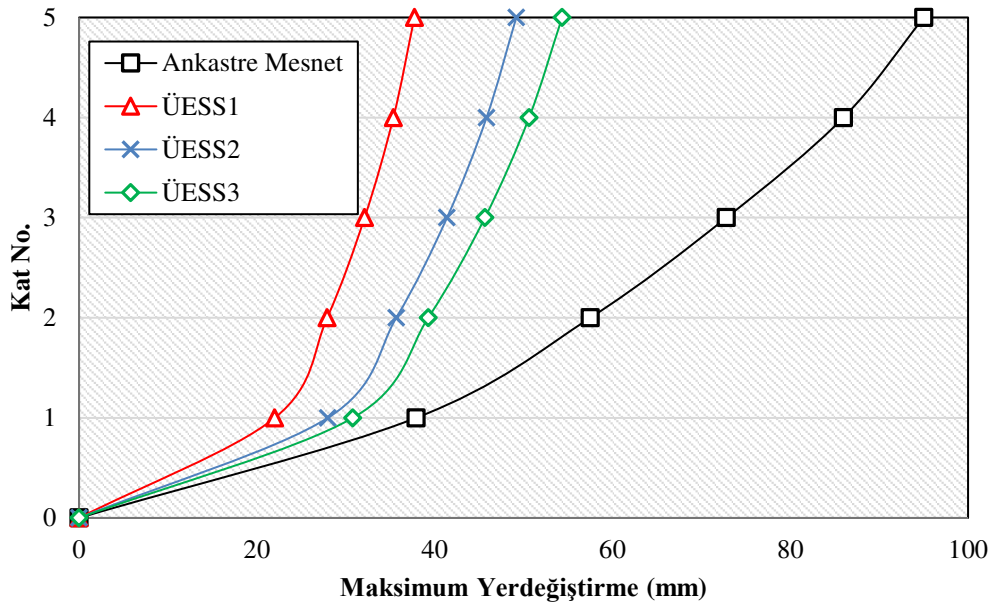
Elde edilen sonuçlara göre sürtünmeli sarkaç izolatör sistemlerinin kullanılması, Northridge depremi altında her kattaki katlar arası ötelenme oranını ankastre mesnetli sisteme göre önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, Şekil 3.18'de görüldüğü gibi ankastre mesnetli yapının 5. katındaki maksimum katlar arası ötelenme oranı %0,465 olarak elde edilirken ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü sistemlerin maksimum katlar arası ötelenme oranları sırasıyla %0,068,% 0,097 ve %0,106 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.18. Ankastr mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kat ötelenme oranları

Şekil 3.19 yapının maksimum görelî kat yerdeğıştirmelerindeki değışimi ankastr mesnet, ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatör mesnet gibi farklı mesnet türleri için göstermektedir. Maksimum görelî yerdeğıştırme, tabana göre her kattaki maksimum yerdeğıştırme değeri dır. Şekilden de görüldüğü gibi, incelenen tüm yapılar söz konusu depremden önemli ölçüde etkilenmiştir.

Northridge depremi etkisindeki 5 katlı ankastr mesnetli yapının 5. kattındaki maksimum görelî yerdeğıştırme değeri 95.03 mm olarak elde edilirken ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapılar için bu değler sırasıyla 37,72 mm, 49,18 mm ve 54,34 mm olarak elde edilmiştir. Ankastr mesnetli yapının görelî yerdeğıştirmesindeki azalma oranları izolatörlü sistemlere göre sırasıyla %60.3, %48.2 ve %42.8 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu durumda sürtünmeli sarkaç izolatör sistemlerin kullanımının ankastr mesnetli yapıya kıyasla maksimum görelî yerdeğıştirmeyi önemli ölçüde azalttığı ortaya çıkmıştır. Bu durumda üç eğrilikli sarkaç izolatörler için sürtünme katsayısının artırılmasının yapı görelî yerdeğıştirmesini arttırdığı soncuna varılmıştır.

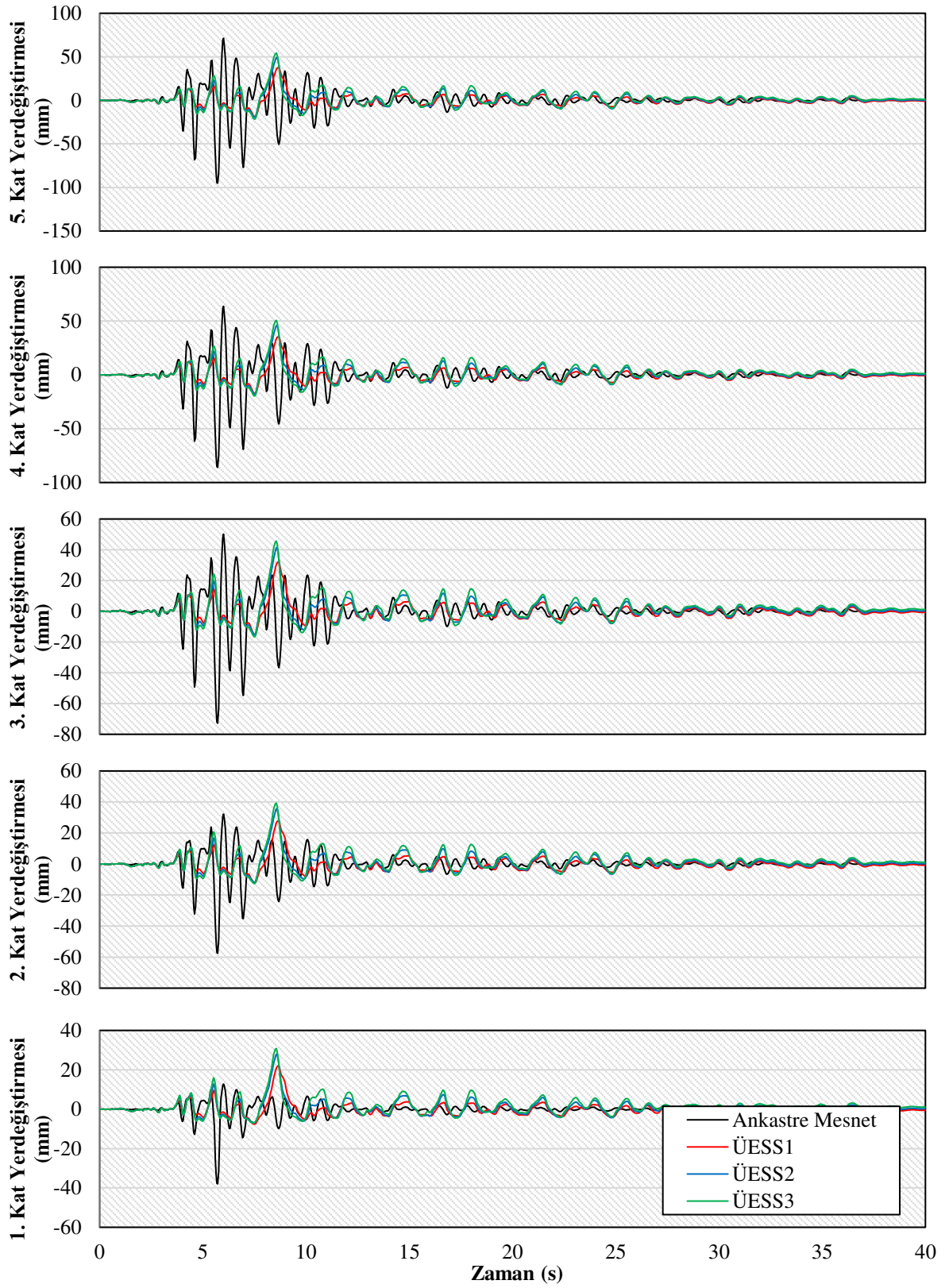


Şekil 3.19. Ankastr mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlardaki maksimum görelî yerdeğıştirmeler

Ankastr mesnetli, ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için her kattaki maksimum görelî yerdeğıştirme değeri Tablo 3.5'te verilmektedir. Ayrıca katlardaki görelî yerdeğıştirmelerin zaman ile değışim grafikleri Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

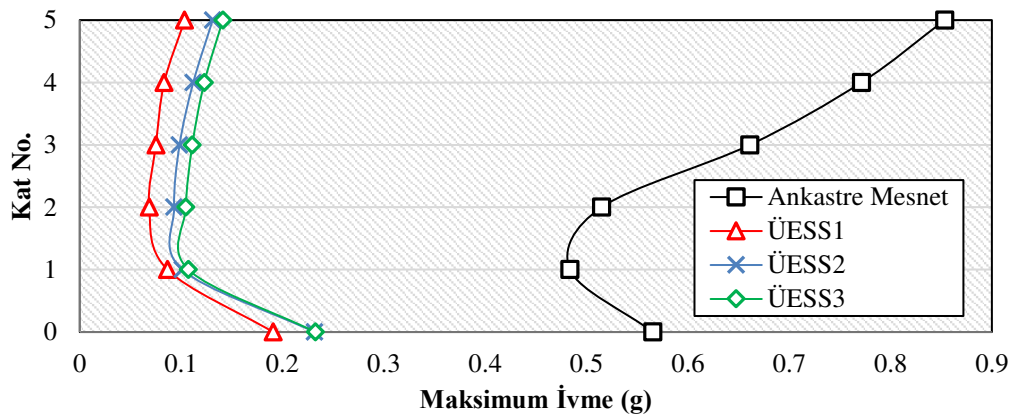
Tablo 3.5. Ankastr mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için katlardaki maksimum görelî yerdeğıştirmeler

Mesnet Tipi	Yerdeğıştirme (mm)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastr Mesnet	0	37.93	57.51	72.82	85.98	95.03
ÜESS1	0	22.02	27.91	32.12	35.36	37.72
ÜESS2	0	27.99	35.69	41.39	45.84	49.18
ÜESS3	0	30.80	39.28	45.66	50.62	54.34



Şekil 3.20. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için görel kat yerdeğiştirmelerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.21 ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinde Northridge depremi etkisinde oluşan maksimum kat ivmelerini göstermektedir. Şekli 3.21 incelendiğinde ankastre mesnetli durumda yer ivmesi 2. kata kadar azalırken ikinci kattan itibaren artmıştır. İzolatörlü sistemlerde ise yer ivmesi yapıya tabanda azaltılmış olarak aktarılırken kat yüksekliği arttıkça ivme değerleri taban değerine göre azalmıştır. Ankastre mesnetli yapıda maksimum ivme 5. katta 0.853g olarak elde edilirken, diğer ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinde 5. Katta sırasıyla 0.104g, 0.131g ve 0.141g olarak elde edilmiştir. 5. kattaki maksimum ivmelerdeki azalma oranları ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için ankastre yapıya kıyasla sırasıyla %87.9, %84.6 ve %83.5 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, minimum sürtünme katsayılı sürtünmeli sarkaç izolatörün ankastre mesnetli yapı ile kıyaslandığında maksimum ivmeyi en büyük oranda azalttığı ortaya çıkmaktadır.

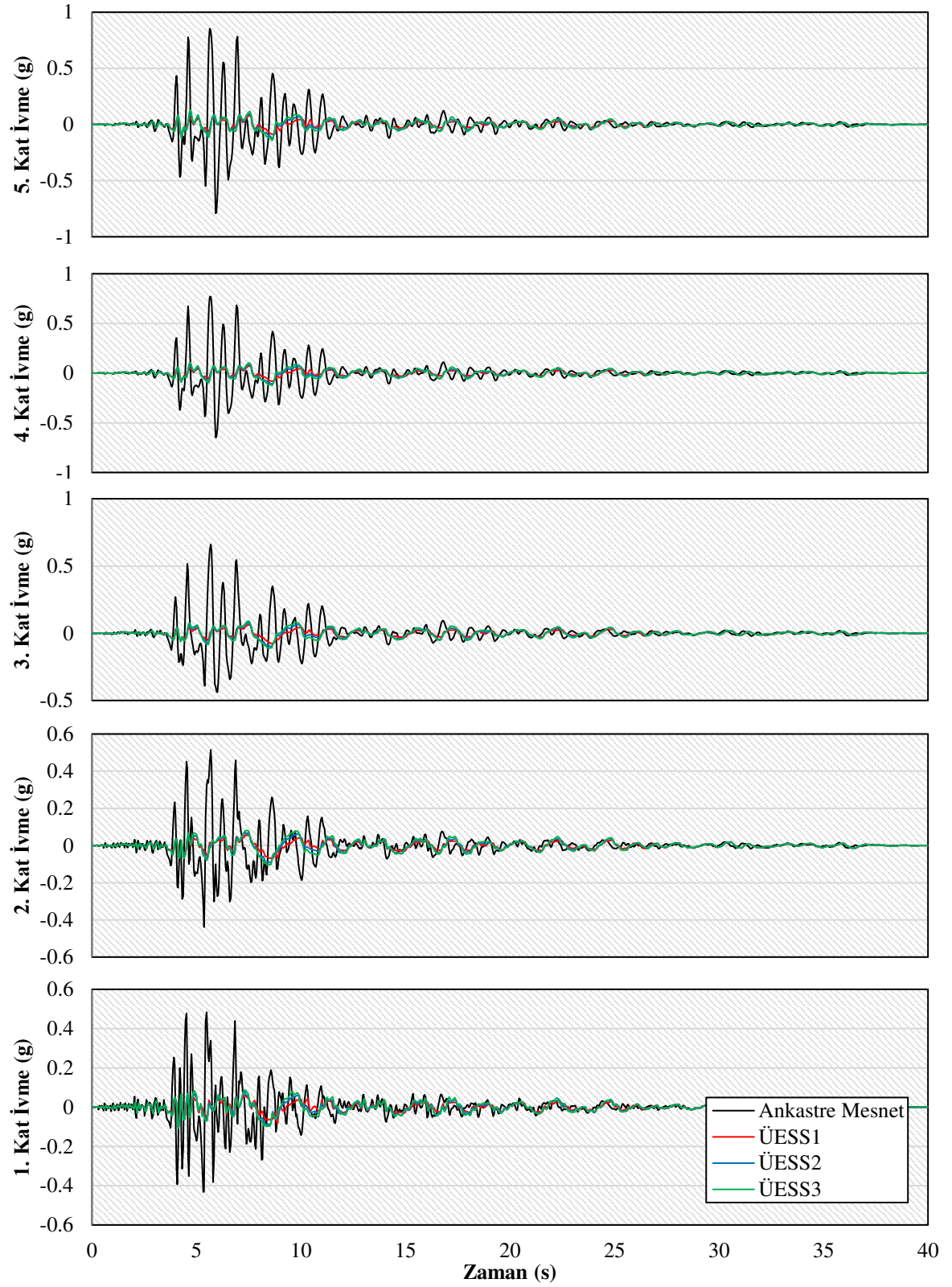


Şekil 3.21. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri

Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için her kattaki maksimum ivme değerleri Tablo 3.6'da verilmektedir. Ayrıca katlardaki ivmelerin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.22'de gösterilmektedir.

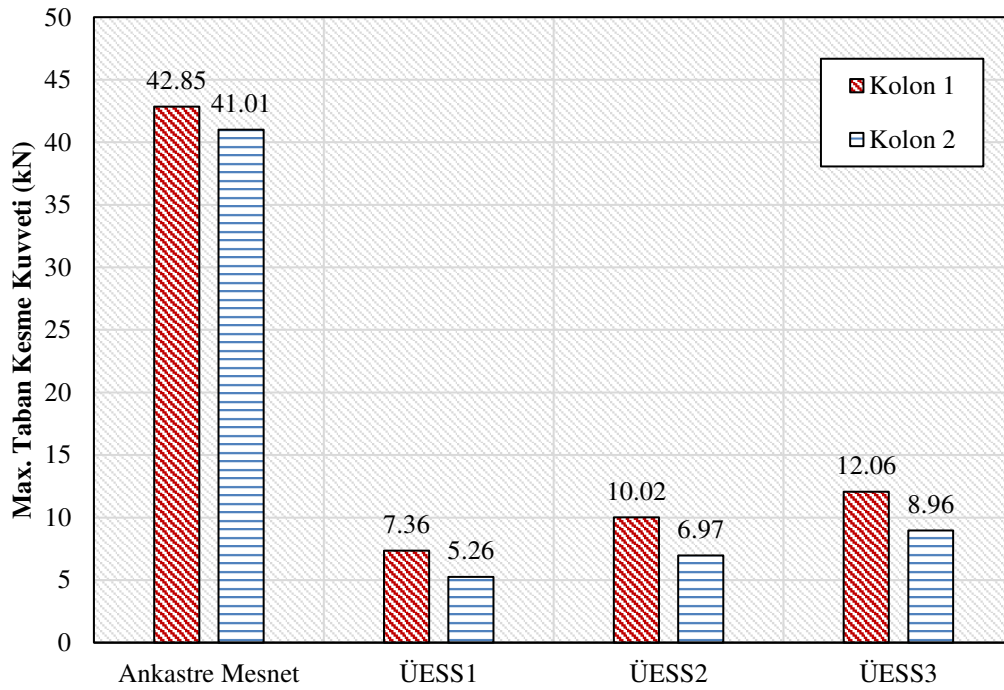
Tablo 3.6. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum ivmeleri

Mesnet Tipi	İvme (g)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0.566	0.484	0.515	0.661	0.771	0.853
ÜESS1	0.191	0.087	0.069	0.075	0.083	0.104
ÜESS2	0.232	0.101	0.093	0.099	0.112	0.131
ÜESS3	0.233	0.107	0.105	0.111	0.123	0.141



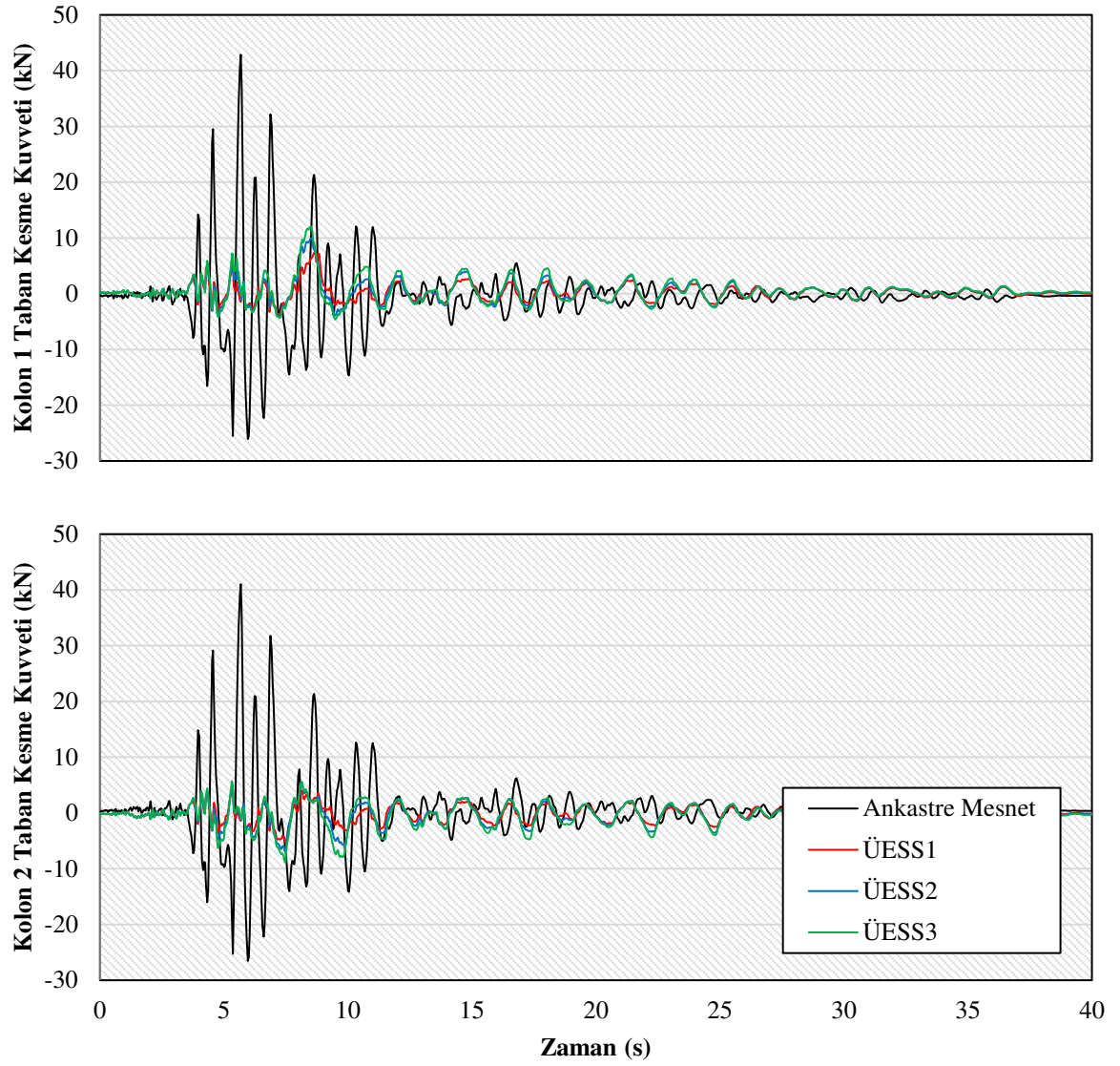
Şekil 3.22. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.23 ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemlerinde Kolon 1 ve 2’de oluşan maksimum taban kesme kuvvetini göstermektedir. Ankastre mesnetli sistemin maksimum taban kesmesi 1. kolonda 42.85 kN ve 2. kolonda 41.01 kN iken, sürtünmeli sarkaç izolasyonun uygulandığı sistemlerin maksimum taban kesme kuvvetleri ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörleri için sırasıyla; kolon 1’de 7.36 kN, 10.02 kN ve 12.06 kN olarak elde edilmiştir. Kolon 2 için ise sırasıyla elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri 5.26 kN, 6.97 kN ve 8.96 kN’dur. Bu değerlere göre izolasyonlu sistemlerde oluşan taban kesme kuvvetlerinin ankastre mesnete göre oldukça düşük olduğu ve artan sürtünme katsayısının kolonlarda oluşan kesme kuvvetini artırdığı sonucuna varılmıştır.



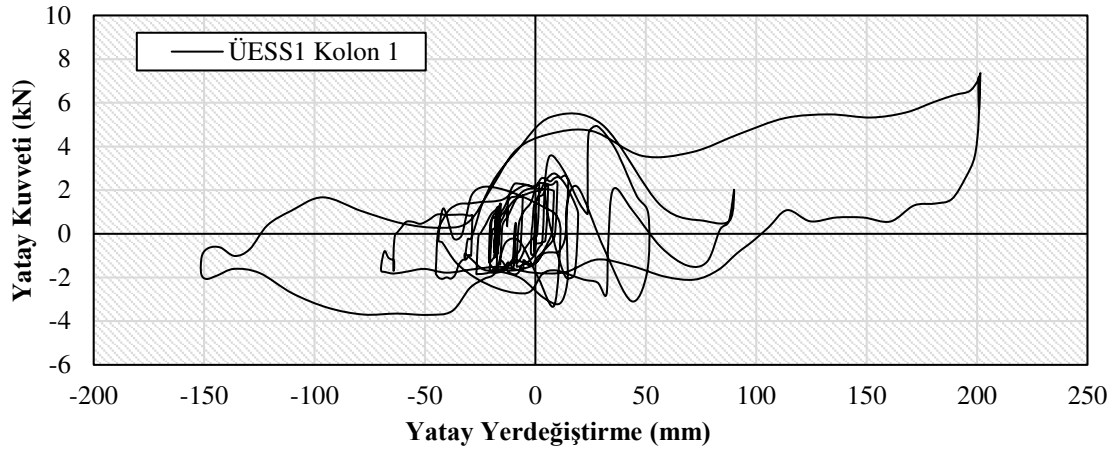
Şekil 3.23. Ankastre mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kolon taban kesme kuvvetleri

Kolon 1 ve 2’de oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.24’te gösterilmektedir.

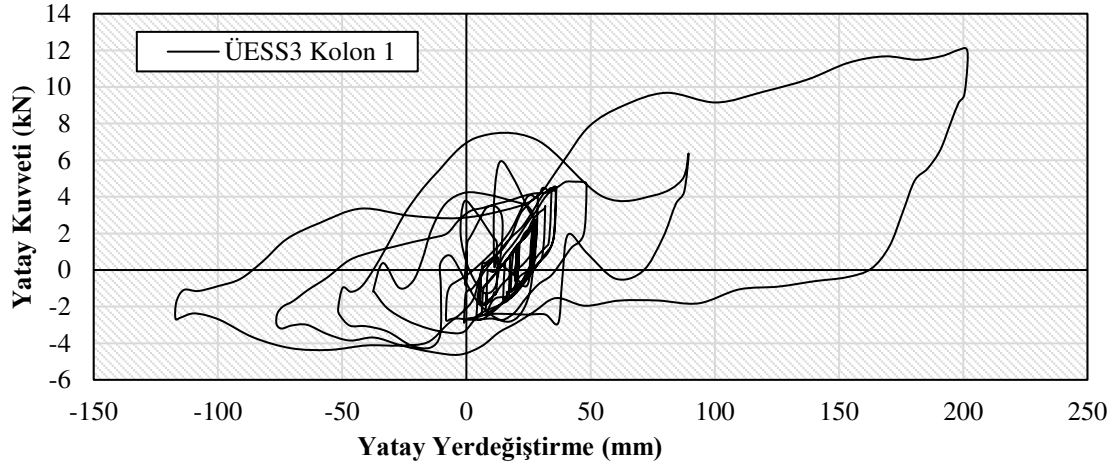


Şekil 3.24. Ankastr mesnetli ve ÜESS1, ÜESS2, ÜESS3 izolatörlü yapı sistemleri için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 Kolon 1 altındaki sırasıyla ÜESS1 ve ÜESS3 izolatörlerinde deprem etkisinde oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde ÜESS1'de oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin 201,52 mm olduğu durumda Kolon 1 tabanında 7.36 kN'luk maksimum kesme kuvveti oluşmuştur. En büyük sürtünme katsayılı ÜESS3 izolatöründe ise 201.67 mm maksimum yatay yerdeğiştirmenin meydana geldiği durumda Kolon 1 tabanında 11.16 kN'luk yatay kesme kuvveti oluşmuştur.

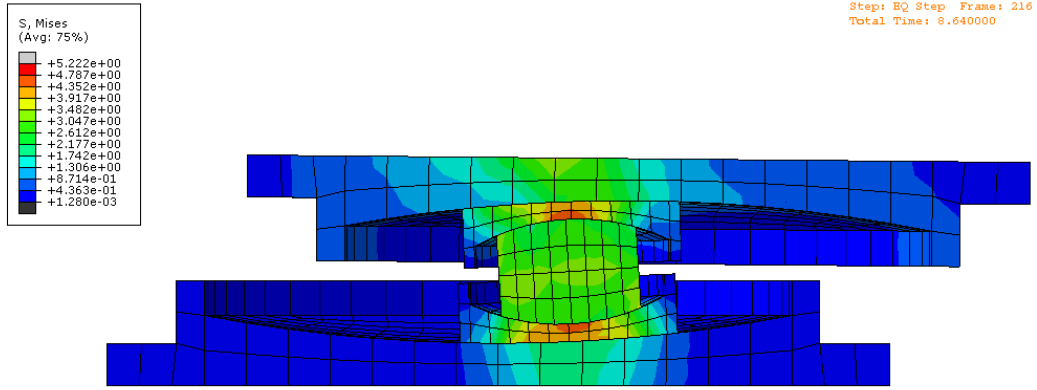


Şekil 3.25. Kolon 1 altındaki ÜESS1 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

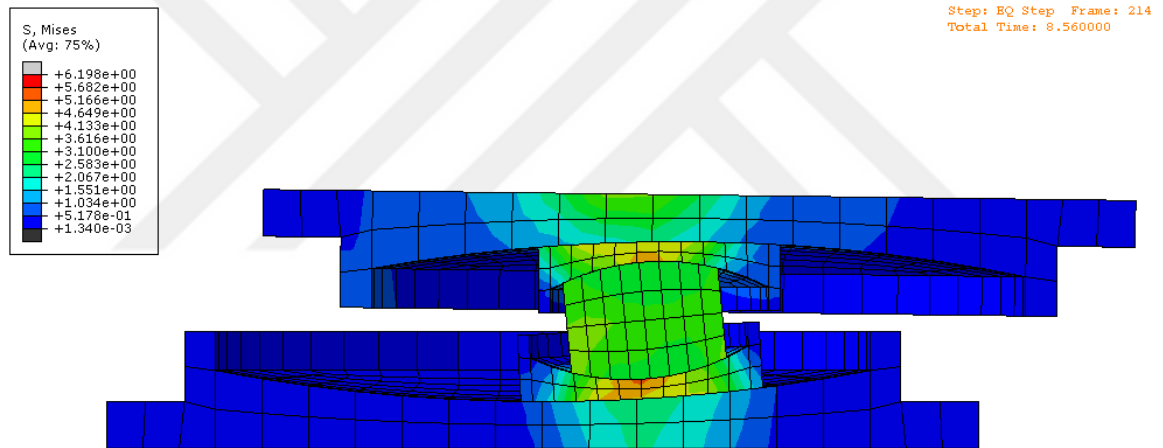


Şekil 3.26. Kolon 1 altındaki ÜESS3 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 sırasıyla Kolon 1 altındaki ÜESS1 ve ÜESS3 izolatörlerin maksimum yerdeğiştirme durumlarındaki izolatör parçalarının konumlarını ve oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.27. Kolon 1 altındaki ÜESS1 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu



Şekil 3.28. Kolon 1 altındaki ÜESS3 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu

3.3. Sürtünme Yüzeyi Eğrilik Yarıçapının Yapı Davranışına Etkileri

Bu bölümde farklı sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçaplarına sahip üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılan yapıların Northridge depremi etkisinde oluşan katlar arası ötelenme oranları, kat yerdeğiştirmeleri, kat ivmeleri ve kolon taban kesme kuvvetleri incelenmiştir.

ÜESS4 izolatörlü yapı ankastre mesnetli yapıyla 5. katta oluşan maksimum katlar arası ötelenme oranı, maksimum yerdeğiştirme ve maksimum ivme açısından karşılaştırıldığında azalma oranları sırasıyla %75.9, %42.3 ve %83.3 olarak elde edilmiştir. ÜESS5 izolatörlü yapı sistemi ile karşılaştırıldığında bu üç değer sırasıyla %79.1, %48.2 ve %84.6 oranlarına ve ÜESS6 sistemi için ise bu üç değer sırasıyla %81.5, %52.3 ve %85.4 oranlarına yükselmiştir. Tüm bu değerlere göre yapı tepkileri için ÜESS6 izolatörünün, ÜESS5 izolatöründen ve ÜESS5 izolatörünün ÜESS4 izolatöründen daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu durumda artan sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçapının yapı tepkilerini azaltmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

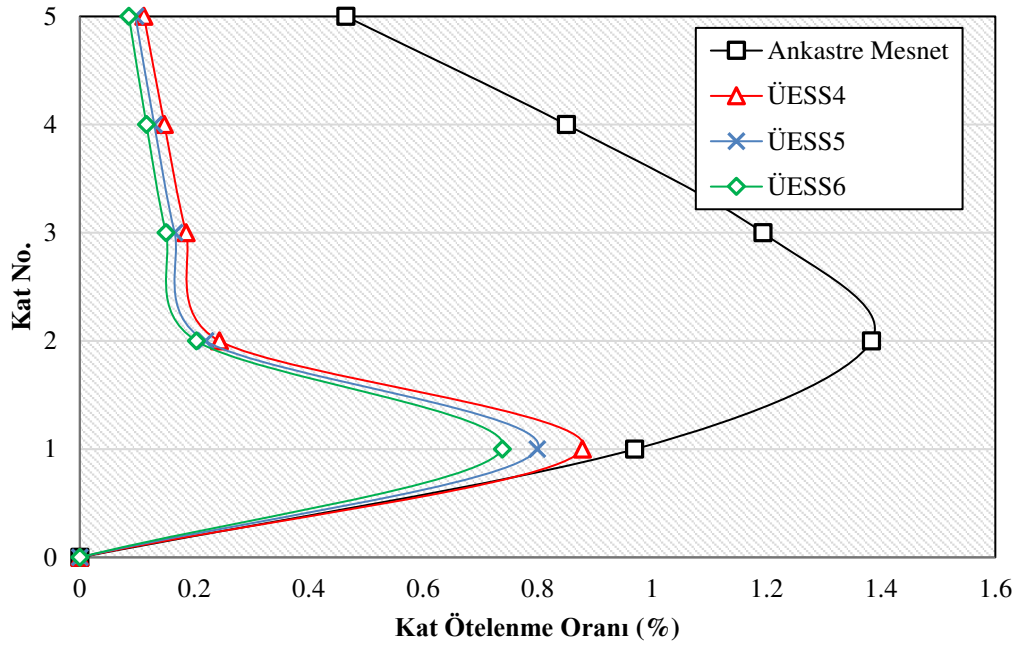
Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum katlar arası ötelenme oranları Tablo 3.7'de verilmektedir.

Tablo 3.7. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları

Mesnet Tipi	Katlar Arası Ötelenme Oranı (%)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0	0.970	1.383	1.194	0.850	0.465
ÜESS4	0	0.879	0.244	0.186	0.148	0.112
ÜESS5	0	0.800	0.220	0.166	0.130	0.097
ÜESS6	0	0.739	0.204	0.151	0.116	0.086

Elde edilen sonuçlara göre sürtünmeli sarkaç izolasyon sistemlerinin kullanılması Northridge depremi etkisindeki ankastre mesnetli sistemin katlar arası ötelenme oranlarını tüm katlarda önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, Tablo 3.7'de görüldüğü gibi 5. kattaki ankastre mesnetli sistemin maksimum katlar arası ötelenme oranı %0,465 olarak elde edilirken ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 sarkaç izolasyonlu sistemlerin maksimum katlar arası ötelenme oranları sırasıyla %0.112, %0.097 ve %0.086 olarak elde edilmiştir.

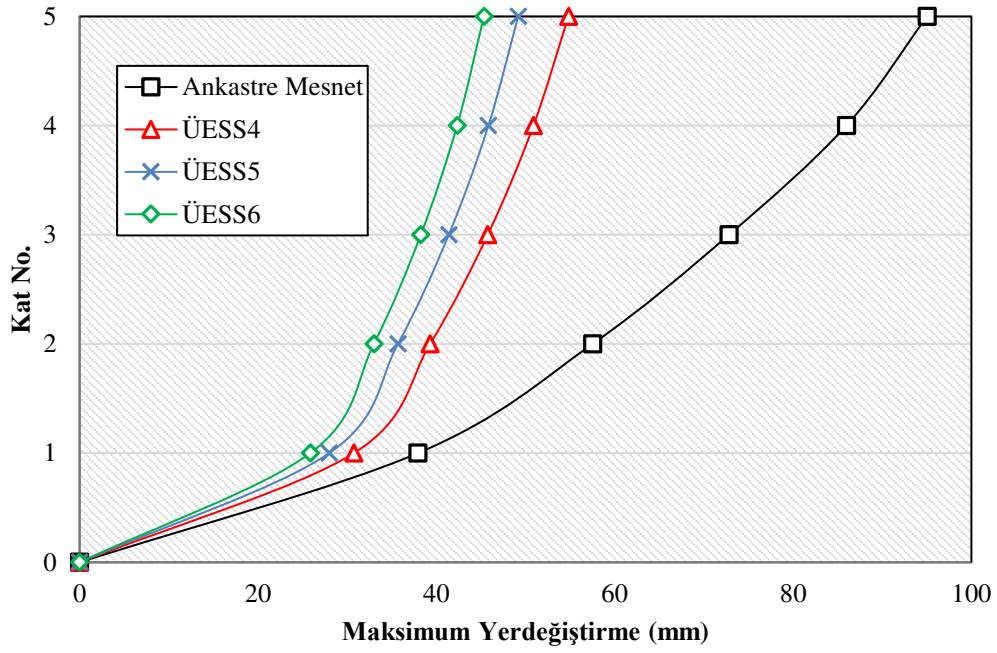
Şekil 3.29 ankastre mesnetli ve izolasyonlu yapılar için katlar arası ötelenme oranındaki değişimi göstermektedir. Şekle göre en büyük eğrilik yarıçapına sahip ÜESS6 izolatörlü yapı diğer izolatörlü yapılara göre daha iyi performans göstererek katlar arası ötelenmeyi önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 3.29. Ankastr mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için katlar arası ötelenme oranları

Şekil 3.30 yapının maksimum görel kat yerdeğiştirmelerindeki değişimi ankastr mesnet, ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatör mesnet gibi farklı mesnet türleri için göstermektedir.

Northridge depremi etkisindeki 5 katlı ankastr mesnetli yapı için 5. kattaki maksimum yerdeğiştirme 95.03 mm olarak elde edilirken ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü yapılar için bu değerler sırasıyla 54.81 mm, 49,18 mm ve 45.34 mm olarak elde edilmiştir. Ankastr mesnetli yapının son katındaki görel yerdeğiştirmesindeki azalma oranları sırasıyla %42.3, %48.2 ve % 52.3'tür. Bu durumda sürtünmeli sarkaç izolasyon sistemlerinin kullanımının ankastr mesnetli yapıya kıyasla maksimum yerdeğiştirmeyi önemli ölçüde azalttığı ve artan eğrilik yarıçapının bu azalma oranını arttırdığı ortaya çıkmıştır.

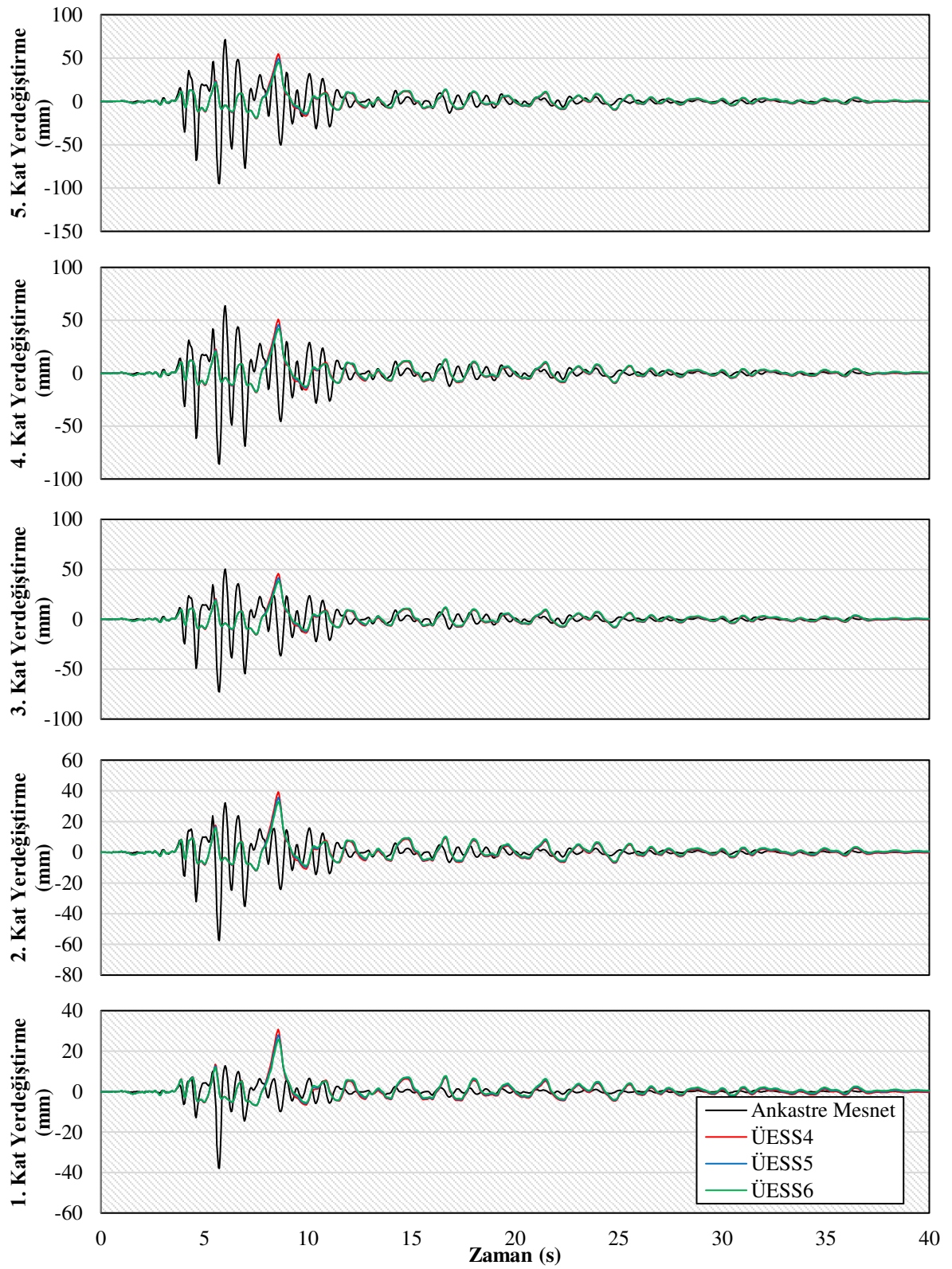


Şekil 3.30. Ankastr mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğıştirmeleri

Ankastr mesnetli, ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için her kattaki maksimum görelî yerdeğıştirme değeri Tablo 3.8'de verilmektedir. Ayrıca katlardaki görelî yerdeğıştirmelerin zaman ile değışim grafikleri Şekil 3.31'de gösterilmektedir.

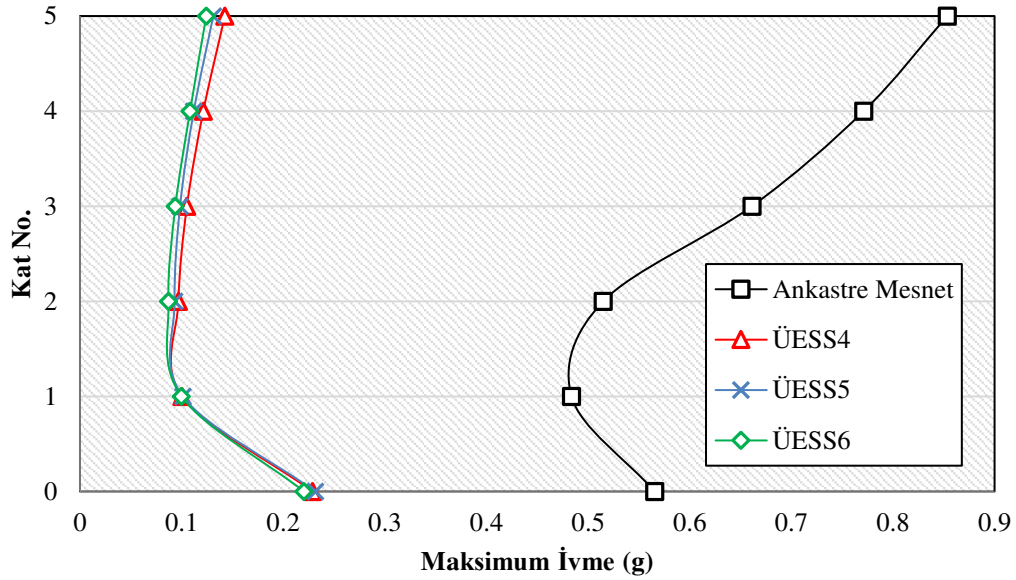
Tablo 3.8. Ankastr mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat yerdeğıştirmeleri

Mesnet Tipi	Yerdeğıştirme (mm)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastr Mesnet	0	37.93	57.51	72.82	85.98	95.03
ÜESS4	0	30.75	39.29	45.76	50.89	54.81
ÜESS5	0	27.99	35.69	41.39	45.84	49.18
ÜESS6	0	25.85	32.99	38.26	42.33	45.34



Şekil 3.31. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için kat yerdeğiştirmenin zaman ile değişimi

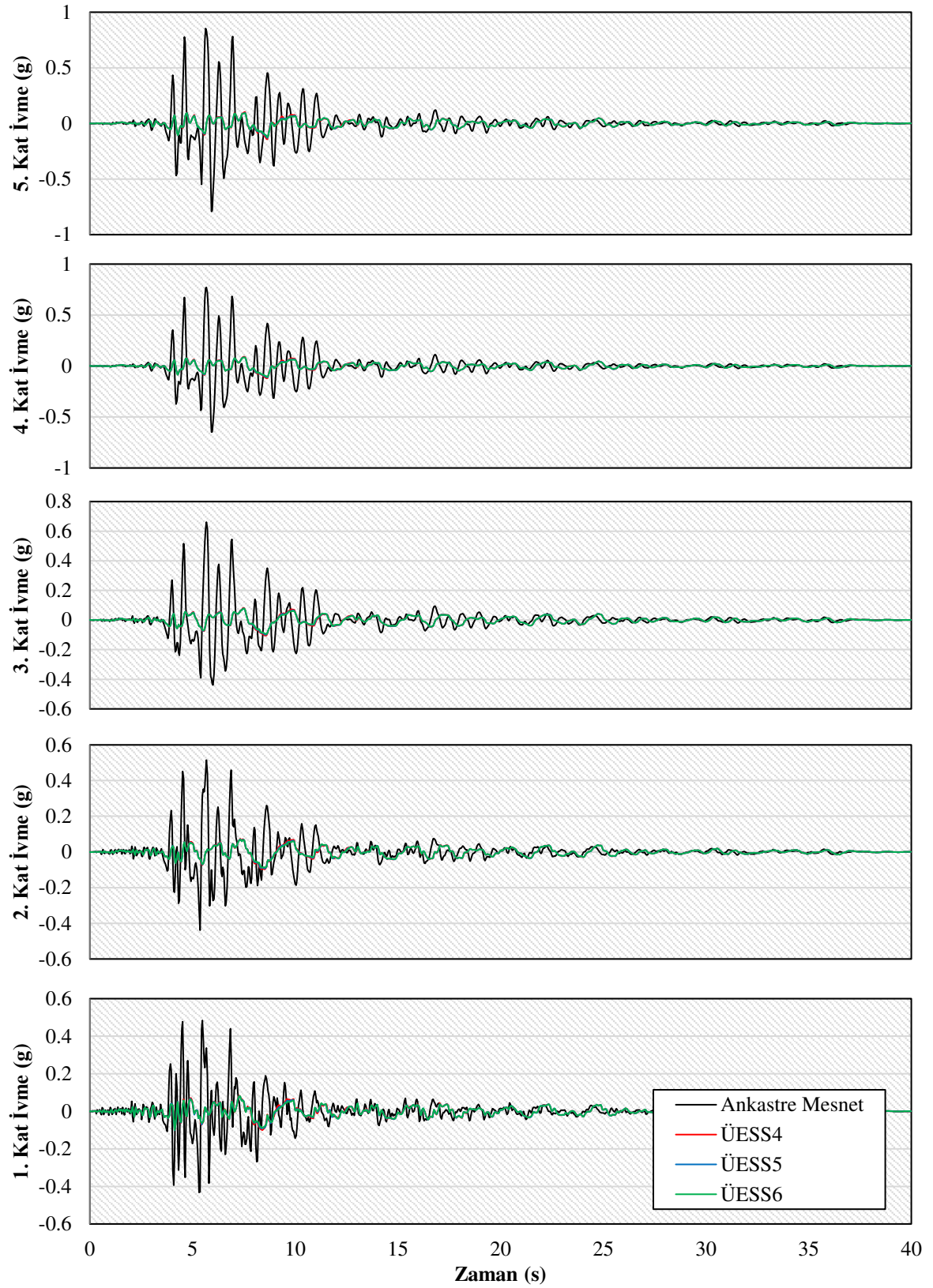
Şekil 3.32 Northridge depremi etkisinde ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü yapılarda oluşan maksimum kat ivme değerlerini göstermektedir ve ilgili değerler Tablo 3.9’de verilmektedir. Ankastre mesnetli yapının maksimum ivmesi 5. katta 0.853g olarak elde edilirken, diğer ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için 5. katta sırasıyla 0.143g, 0.131g ve 0.124g olarak elde edilmiştir. 5. kattaki ivmelerdeki azalma oranları ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6, izolatörlü yapı sistemleri için ankastre mesnetli yapıya kıyasla sırasıyla % 83.3, % 84.6 ve % 85.4 oranlarında daha azdır. Bu değerlere göre sürtünmeli sarkaç izolasyon sisteminin ve artan eğrilik yarıçapının katlarda oluşan maksimum ivmeleri azalttığı ortaya çıkmıştır. Tüm katlardaki ivmelerin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.33’te gösterilmektedir.



Şekil 3.32. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri

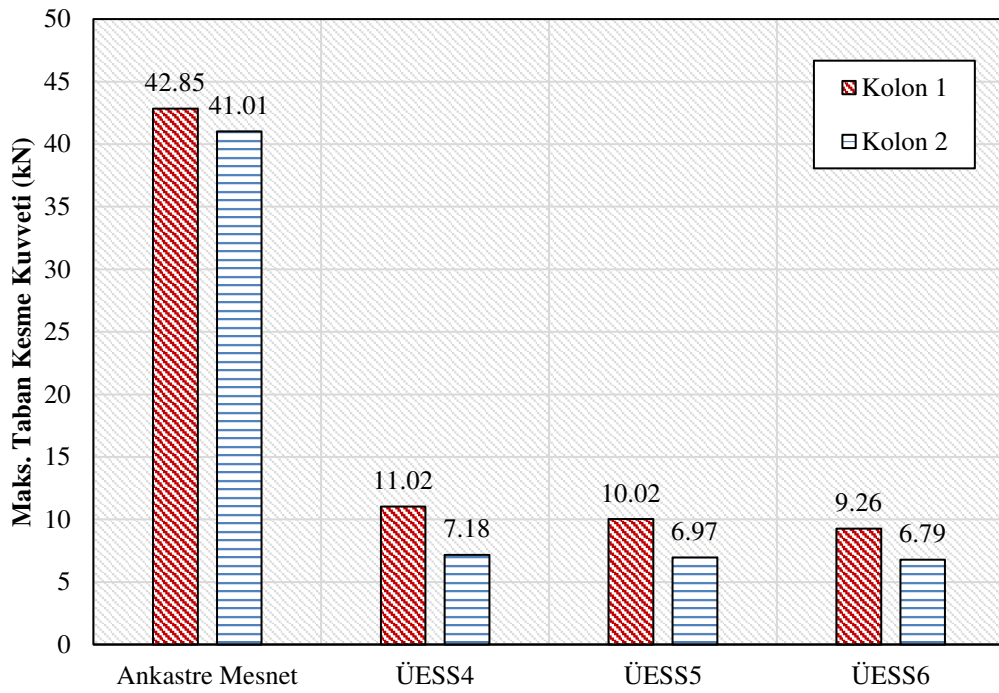
Tablo 3.9. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin maksimum kat ivmeleri

Mesnet Tipi	İvme (g)					
	Temel	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat
Ankastre Mesnet	0.566	0.484	0.515	0.661	0.771	0.853
ÜESS4	0.229	0.100	0.097	0.105	0.121	0.143
ÜESS5	0.232	0.101	0.093	0.098	0.112	0.131
ÜESS6	0.221	0.100	0.087	0.094	0.108	0.124



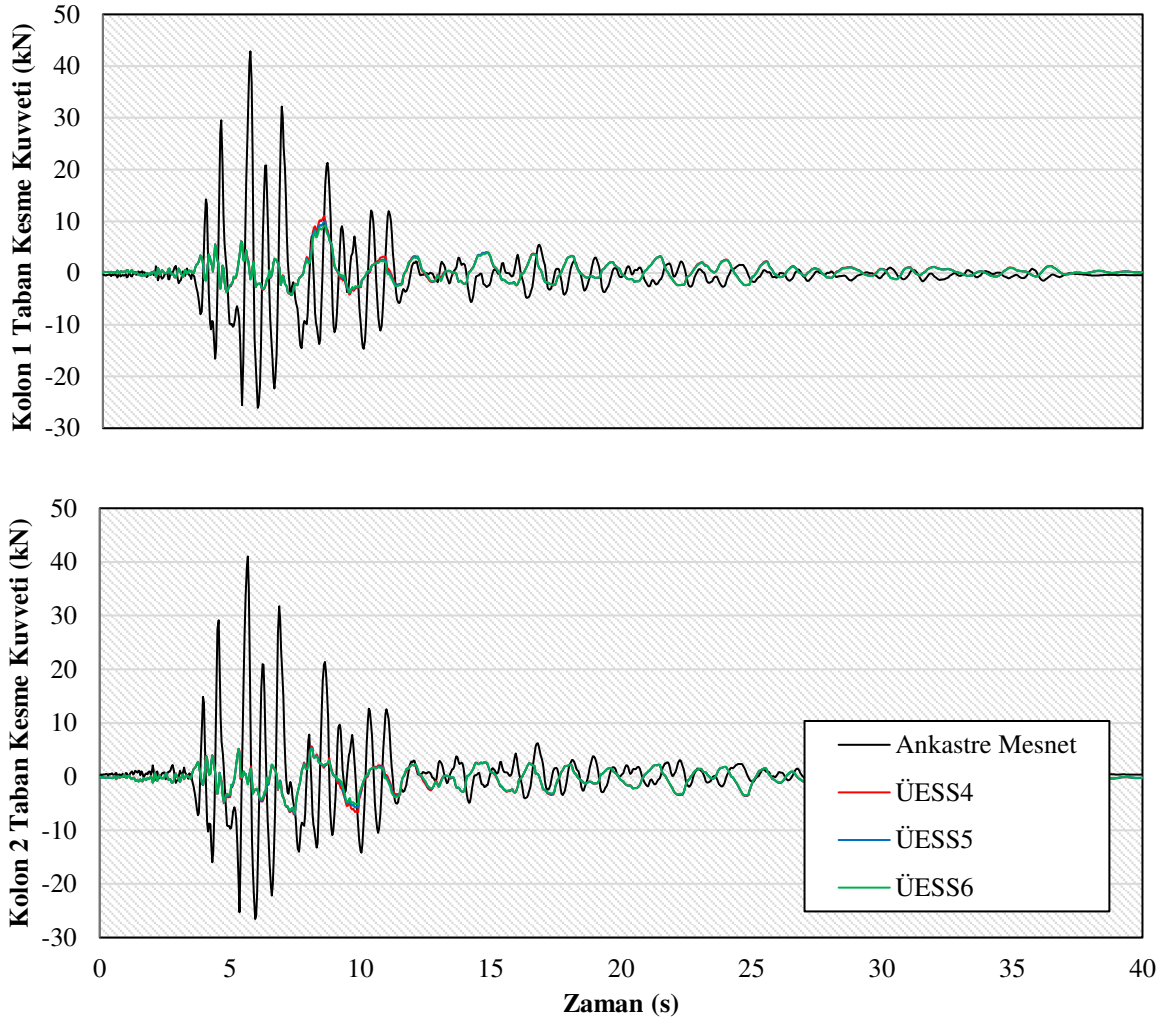
Şekil 3.33. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemlerinin kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.34'te görüldüğü gibi Northridge depremi etkisindeki beş katlı yapı için ankastre mesnetli sistemin maksimum taban kesmesi 1. kolonda 42.85 kN ve 2. kolonda 41.01 kN iken sürtünmeli sarkaç izolasyonun uygulandığı sistemlerin maksimum taban kesme kuvvetleri ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörleri için sırasıyla; kolon 1'de 11.02 kN, 10.02 kN ve 9.26 kN olarak elde edilmiştir. Kolon 2 için ise sırasıyla elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri 7.18 kN, 6.97 kN ve 6.79 kN'dir. Bu değerler incelendiğinde artan eğrilik yarıçapının maksimum taban kesme taleplerini bir miktar azalttığı görülmüştür.



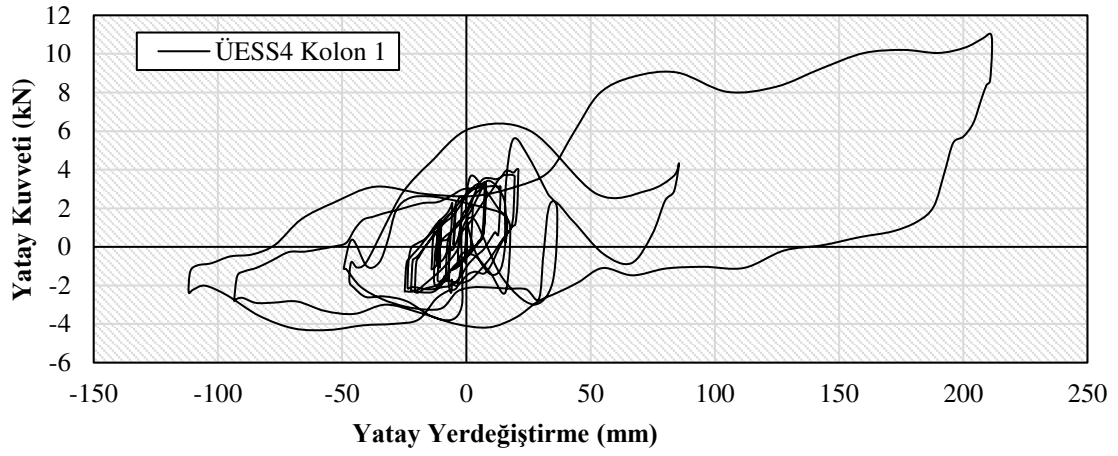
Şekil 3.34. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için maksimum kolon taban kesme kuvvetleri

Kolon 1 ve 2’de oluşan taban kesme kuvvetlerinin zaman ile değişim grafikleri Şekil 3.35’de gösterilmektedir.

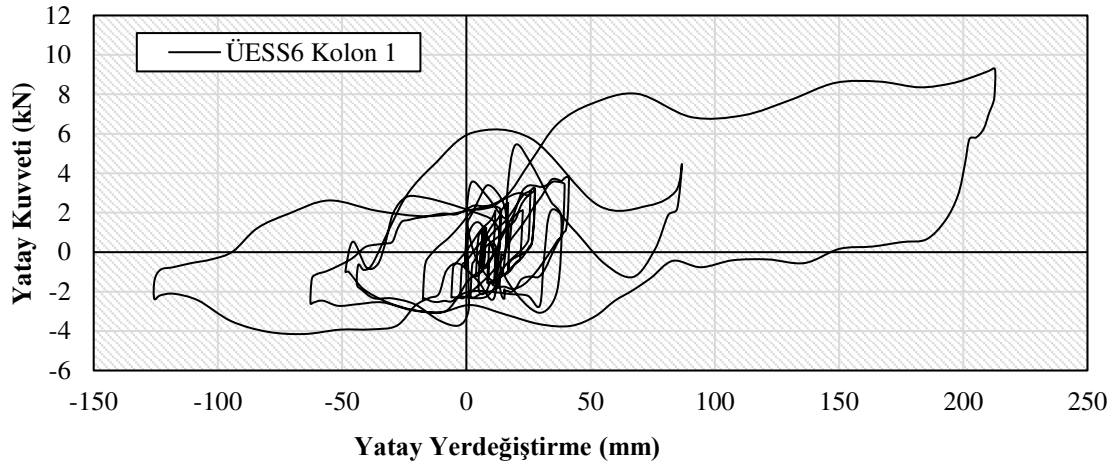


Şekil 3.35. Ankastre mesnetli ve ÜESS4, ÜESS5, ÜESS6 izolatörlü yapı sistemleri için kolon kesme kuvvetlerinin zaman ile değişimi

Şekil 3.36 ve Şekil 3.37 sırasıyla Kolon 1 altındaki ÜESS4 ve ÜESS6 izolatörlerinde deprem süresince oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde maksimum kesme kuvvetlerinin maksimum yatay yerdeğiştirme durumunda meydana geldiği anlaşılmaktadır.

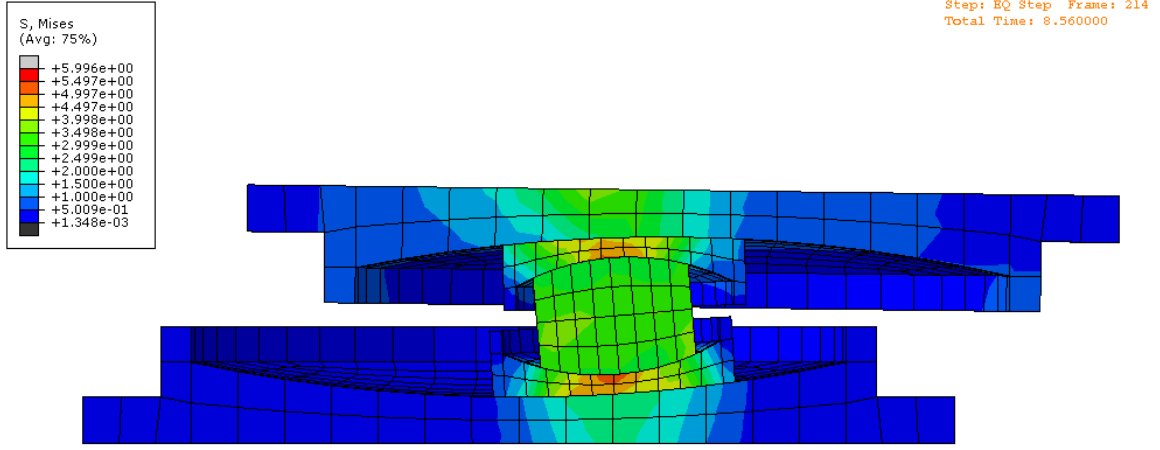


Şekil 3.36. Kolon 1 altındaki ÜESS4 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

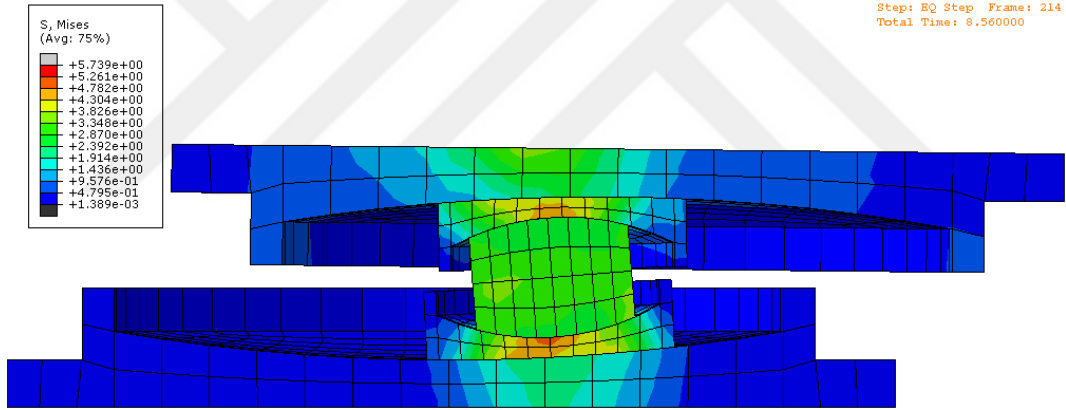


Şekil 3.37. Kolon 1 altındaki ÜESS6 izolatöründe oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü

Şekil 3.38 ve Şekil 3.39 sırasıyla Kolon 1 altındaki ÜESS4 ve ÜESS6 izolatörlerinin maksimum yerdeğiştirme durumlarındaki izolatör parçalarının konumlarını ve oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.38. Kolon 1 altındaki ÜESS4 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu



Şekil 3.39. Kolon 1 altındaki ÜESS6 izolatörün maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumu

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Depremeler yeryüzünde sıklıkla meydana gelen doğal olaylardır. Depremelerin oluşumunda tektonik plakaların yatay ve/veya düşey hareketleri etkilidir. Bu hareketler hissedilmeyecek kadar küçük veya yapılara ciddi zararlar verebilecek kadar büyük olabilirler. Yapılar bu yer hareketlerine dinamik olarak tepki vererek oluşacak tepkiyi artırmaktadır. Bu dinamik tepkiyi azaltmak amacıyla yapı sismik izolasyon sistemlerinin kullanılması günümüzde en etkili yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri yapının doğal titreşim periyodunu deprem yer hareketinin hakim periyodunun ötesine taşıyarak rezonans etkisinden kaynaklanabilecek atalet yükleri azaltarak etkili olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında sismik izolasyonu tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör, çift eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılarak gerçekleştirilmiş beş katlı betonarme bir yapının zaman tanım alanında analizleri ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörün sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları değiştirilerek yapıda oluşan tepkiler maksimum göreceli yerdeğiştirme, katlar arası ötelenme oranı, kat ivmeleri ve kolon taban kesme kuvveti açısından incelenerek ankastre mesnetli durum ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler yardımıyla sunulmuştur. Çalışmanın elde edilen temel sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ❖ Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı sismik izolasyonlu yapıların her biri ankastre mesnetli yapı ile karşılaştırıldığında yapıda oluşan göreceli kat yerdeğiştirmelerinin, kat ivmelerinin ve taban kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür.
- ❖ Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörler karşılaştırıldığında tüm bu sismik tepkiler için ÜESS izolatörün TESS ve ÇESS izolatörlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Örnek olarak 5. kattaki maksimum ötelenme oranı, yerdeğiştirme ve ivme değerleri ankastre mesnetli yapı ile karşılaştırıldığında azalma oranları ÜESS için sırasıyla %79.1, %48.2, %84.6, ÇESS için %79.8, %46.8, %82.4 ve TESS için %71.3, %36.7, %78.6 olarak elde edilmiştir.

- ❖ Farklı sürtünme katsayılarına sahip ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü yapılar incelendiğinde sürtünme katsayılarındaki artmanın yapıda oluşan katlar arası ötelenme oranlarını, görelî yerdeğıştirmeleri, maksimum ivmeleri ve kolon taban kesme kuvvetlerini arttırdığı görülmüştür. Örnek olarak 5. kattaki maksimum ötelenme oranı, yerdeğıştirme ve ivme değeri ÜESS1 için sırasıyla %0,068, 37,72 mm, 0.104g, ÜESS2 için % 0,097, 49,18 mm, 0.131g ve ÜESS3 için %0,106, 54,34 mm, 0.141g olarak elde edilmiştir. Kolon 1’de oluşan taban kesme kuvveti ise ÜESS1, ÜESS2 ve ÜESS3 izolatörlü sistemler için sırasıyla 7.36 kN, 10.02 kN ve 12.06 kN olarak elde edilmiştir.
- ❖ Farklı sürtünme yüzeyi eğrilik yarıçaplarına sahip ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü yapılar incelendiğinde eğrilik yarıçapının artmasının yapıda oluşan katlar arası ötelenme oranlarını, görelî yerdeğıştirmeleri, maksimum ivmeleri ve kolon taban kesme kuvvetlerini azalttığı görülmüştür. Örnek olarak 5. kattaki maksimum ötelenme oranı, yerdeğıştirme ve ivme değeri ÜESS4 için sırasıyla %0.112, 54.81 mm, 0.143g, ÜESS5 için için %0.097, 49,18 mm, 0.131g ve ÜESS6 için %0.086, 45.34 mm, 0.124g olarak elde edilmiştir. Kolon 1’de oluşan taban kesme kuvveti ise ÜESS4, ÜESS5 ve ÜESS6 izolatörlü sistemler için sırasıyla 11.02 kN, 10.02 kN ve 9.26 kN olarak elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalar için yapının kendi ağırlığının izolatör performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla binanın kat sayısında değışiklikler yapılabilir. Ayrıca yatay ve düşey deprem etkisinde simetrik olmayan yapılar dikkate alınabilir.

5. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2014. Analysis User's Guide Volume IV: Elements Version 6.14, Dassault Systemes Simulia, Inc., Providence, RI, USA.
- Aguiar, R., Villarruel, G., Caiza, P., Roberto, T. ve Falconí, A., 2017. Implications Of Friction Coefficient Variation In The Seismic Analysis Of Structures With Triple Friction Pendulum Systems (FPS) An Application Case, 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017.
- Calvi, P. M., Moratti, M. ve Calvi, G. M., 2016. Seismic isolation devices based on sliding between surfaces with variable friction coefficient, Earthquake Spectra, 32(4), 2291–2315.
- Charney, F. A., 2008. Unintended consequences of modeling damping in structures: Rayleigh damping, 17th Analysis and Computation Specialty Conference, 134 (4)(April), 581–592.
- Chopra, A. K., 1995. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Chopra, A. K. ve McKenna, F., 2016. Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45 (2), 193–211.
- Dao, N. D., 2012. Seismic Response of a Full-scale 5-story Steel Frame Building Isolated by Triple Pendulum Bearings under 3D Excitations.
- Deringöl, A. H., 2018. Seismic performance of steel moment frames with variable friction pendulum systems under real ground motions, International Advanced Researches and Engineering Journal, 02(03), 208–216.
- Deringöl, A. H. ve Güneyisi, E. M., 2019. Effect of friction pendulum bearing properties on behaviour of buildings subjected to seismic loads, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125(June), 105746.
- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2006. Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(11), 1403–1424.
- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2008a. Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis, Earthquake Spectra, 24(4), 1011–1028.

- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2008b. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37(2), 185–205.
- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2008c. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37(2), 163–183.
- Hall, J. F., 2018. Performance of viscous damping in inelastic seismic analysis of moment-frame buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 47(14), 2756–2776.
- Loghman, V., Khoshnoudian, F. ve Banazadeh, M., 2015. Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures, JVC/Journal of Vibration and Control, 21(11), 2099–2113.
- Malekzadeh, M. ve Taghikhany, T., 2012. Multi-stage performance of seismically isolated bridge using triple pendulum bearings, Advances in Structural Engineering, 15(7), 1181–1196.
- Moeindarbari, H. ve Taghikhany, T., 2014. Seismic optimum design of triple friction pendulum bearing subjected to near-fault pulse-like ground motions, Structural and Multidisciplinary Optimization, 50(4), 701–716.
- Morgan, T. A. ve Mahin, S. A., 2011. The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives Tokyo Institute of Technology. In PEER Report 2011/06 (Issue July).
- Namiranian, P., Ghodrati Amiri, G. ve Veismoradi, S., 2016. Near-fault seismic performance of triple variable friction pendulum bearing, Journal of Vibroengineering, 18(4), 2293–2303.
- Nguyen, N. V., Hoang, H. P. ve Huong, K. T., 2018. Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 143(1).
- Pigouni, A. E., Castellano, M. G., Infanti, S. ve Colato, G. P., 2020. Full-scale dynamic testing of pendulum isolators (Curved surface sliders), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 130(November 2019), 105983.
- Priestley, M. J. N. ve Grant, D. N., 2005. Viscous damping in seismic design and analysis, Journal of Earthquake Engineering, 9(SPEC. ISS. 2), 229–255.
- Rayleigh, L., 1898. The Theory of Sound. In Nature (Vol. 58, Issue 1493, pp. 121–122).

- Reyes, J. C., Herrera, M. T., Paul Smith-Pardo, J. ve Córdoba, L. S., 2020. Effective live load mass for storage buildings on friction-pendulum isolators, Engineering Structures, 218(May), 110843.
- Salehi, M. ve Sideris, P., 2020. Enhanced Rayleigh Damping Model for Dynamic Analysis of Inelastic Structures, Journal of Structural Engineering, 146(10), 04020216.
- Xu, Y., Guo, T. ve Yan, P., 2019. Design optimization of triple friction pendulums for base-isolated high-rise buildings, Advances in Structural Engineering, 22(13), 2727–2740.
- Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2011. Modeling of triple concave friction pendulum bearings for seismic isolation of buildings, Structural Engineering and Mechanics, 40(3), 315–334.
- Zayas, V., Low, S. ve Mahin, S., 1990. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, Earthquake Spectra, 6(2), 317–333.

ÖZGEÇMİŞ

Riau Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Bir yıl Türkçe okudu ve 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.

