



T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜRTÜNMELİ SARKAÇ İZOLATÖRLÜ YAPILARIN
TEKRARLI DEPREMLER ALTINDAKİ TEPKİSİ

Mehmet Mustafa AÇIKYÜREK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR
İkinci Danışman: Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ

OCAK – 2026

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜRTÜNMELİ SARKAÇ İZOLATÖRLÜ YAPILARIN
TEKRARLI DEPREMLER ALTINDAKİ TEPKİSİ

Mehmet Mustafa AÇIKYÜREK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

İkinci Danışman: Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ

OCAK – 2026

YOZGAT

	YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU
---	---

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı Mehmet Mustafa AÇIKYÜREK' in hazırladığı “Sürtünmeli Sarkaç İzolatörlü Yapıların Tekrarlı Depremler Altındaki Tepkisi” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 08/01/2026 Perşembe günü saat 10:30'da yapılmış, tezin onayına **oy birliği** ile karar verilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Zülküf KAYA

Jüri Üyesi (Danışman) : Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Okan ANADUT

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../ 20.....

Prof. Dr. Ümit BUDAK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhine doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

08/01/2026

İmza

Mehmet Mustafa AÇIKYÜREK

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Sürtünmeli Sarkaç İzolatörlü Yapıların Tekrarlı Depremler Altındaki Tepkisi” isimli tezimde bana her zaman destek olan; bilgisini, tecrübesini, önerilerini ve bu çalışmanın her noktasında yardımını hiçbir zaman esirgemeyen ayrıca son derece samimi davranışları, konuşmaları ve neşesi ile iyi ki tanımışım dediğim saygıdeğer kıymetli danışmanım Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR hocama ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ hocama sonsuz teşekkür ve minnetimi sunuyorum.

Bu yolda benden hiçbir zaman emeğini esirgemeyen ve benim için her zaman her şeyden önemli ve kıymetli olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ediyorum.

Önemli vakitlerini ayırıp sunumda bulunan bütün kıymetli hocalarıma teşekkür ediyorum.

Mehmet Mustafa AÇIKYÜREK

08/01/2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRTÜNMELİ SARKAÇ İZOLATÖRLÜ YAPILARIN TEKRARLI DEPREMLER ALTINDAKİ TEPKİSİ

MEHMET MUSTAFA AÇIKYÜREK

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

İKİNCİ DANIŞMAN: Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ

Sismik izolasyon, yapıların depreme karşı korunması ve yapıların deprem performansının iyileştirilmesinde önemli yöntemlerdendir. Bu yöntemde deprem enerjisi yapının altına yerleştirilen izolatörler tarafından tüketilmektedir ve yapı böylece aşırı yer değiştirme taleplerine karşı korunmaktadır. İzolatörün türüne bağlı olarak davranış, sürtünme tipli izolatörler için sürtünme katsayısı, efektif kayma yarıçapı, üzerindeki eksenel yük vb. parametreler ile belirlenmektedir. İzolatörlerin tekil deprem etkisi altındaki yapılar üzerindeki etkileri iyi bir şekilde bilinse de tekrar eden depremler altında davranışlarının ve yapıya etkilerinin araştırılması özellikle artçı şokların büyük olduğu bölgeler için önemlidir. Bu çalışma kapsamında tekrar eden depremler altında izolatörlü yapıların davranışı araştırılmıştır. Bu parametrik çalışmada hem izolatör hem de üst yapıya ait parametreler elli bin adet olarak belirlenmiş ve hem artçı şok hem de artçı şok olmadan deprem ivmeleri altında analiz edilmiştir. Analizler hem iki hem de üç yüzeyli sürtünmeli izolatör sistemleri için gerçekleştirilmiştir. Farklı tepkiler kaydedilmiş, yapı ve izolatör davranışlarının ana şoka göre nasıl değiştiği araştırılmıştır. Ana şok depreminin özelliklerine bağlı olarak izolatör ve yapı davranışları önerilen katsayılar ile tahmin edilebilir. Sonuçlar çalışma kapsamında göz önüne alınan tepkiler için ortalama değer olarak ve kümülatif dağılım fonksiyonları ile verilmiştir.

2026, xxiii+121 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Deprem, Sismik İzolasyon, Sürtünmeli Sarkaç, Artçı Şok

ABSTRACT

MASTER THESIS

RESPONSE OF STRUCTURES WITH FRICTION PENDULUM ISOLATOR UNDER REPEATED EARTHQUAKES

MEHMET MUSTAFA AÇIKYÜREK

YOZGAT BOZOK UNIVERSITY

SCHOOL of GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

CO-SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. Oğuz DÜĞENCİ

Seismic isolation is one of the important methods to protect structures against earthquakes and enhance performance of structures. In this method, earthquake energy is dissipated via isolators placed underneath the structures and hence the structure is protected against from excessive displacement demands. Depending on the type of the isolator, its behavior is determined with some parameters like friction coefficient, effective radius of sliding, axial load on it etc. for the friction type isolator. Although, effect of isolators on structures under single earthquake is well-known, it is important to investigate their behavior under repeated earthquakes, especially for those regions where aftershocks are strong. In this study behavior of structures with isolator is investigated under repeated earthquakes. In this parametric study, parameters related to both superstructure and isolator are determined as fifty-thousand and structures are analyzed under earthquake accelerations with and without aftershock shaking. Analyses are performed for both double and triple friction pendulum systems. Different responses are recorded and it is investigated how structural and isolator demand changes relative to main shock. Depending on main shock properties, structural and isolator demands could be predicted using the proposed coefficients. Results are given as average value and fragility curves for each response considered in this study.

2026, xxiii+121 Pages

Keywords: Earthquake, Seismic Isolation, Friction Pendulum, Aftershock

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
RESİMLER LİSTESİ.....	xvi
DENKLEMLER LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	xx
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Deprem Kavramı	1
1.2.Deprem Mühendisliğinin Tarihi Gelişimi	2
1.3.Sismik İzolatörler ve Kullanım Amaçları	4
1.4.Sismik İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırması	7
1.4.1.Aktif Kontrol Sistemleri	7
1.4.1.1.Aktif Kütle Sönümleyici Sistemler.....	8
1.4.1.2.Aktif Taban İzolasyonu.....	8
1.4.1.3.Doğrudan Kuvvet Kontrolü	8
1.4.2.Pasif Kontrol Sistemleri.....	9
1.4.2.1.Pasif Enerji Sönümleyici Sistemler	9
1.4.2.1.1.Metalik Sönümleyiciler	9
1.4.2.1.2.Visko-Elastik Sönümleyiciler.....	10
1.4.2.1.3.Ayarlı Akışkan Sönümleyiciler	11

1.4.2.1.4.Ayarlı Kütle Sönümleyiciler.....	11
1.4.3.Taban İzolasyon Sistemleri.....	12
1.4.3.1.Elastomer Sistemler	12
1.4.3.2.Yüksek Sönümlü Kauçuk Tip İzolatörler	13
1.4.3.3.Kurşun Çekirdekli Kauçuk Tip İzolatörler	15
2.SÜRTÜNME Lİ SARKAÇ TİPLİ İZOLATÖR	18
2.1.Tek Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli İzolatörler	21
2.2.Çift Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli Sönümleyiciler	24
2.3.Üç Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli Sönümleyiciler	32
2.4.Problem durumu / Konunun tanımı.....	35
2.5.Artçı Şok ve Ana Şok.....	36
3.GEREÇ ve YÖNTEM	40
3.1.Üst yapıya ait parametreler.....	41
3.2.Tasarlanacak Olan İzolatör ve Yapıya Ait Girdi Özellikleri.....	51
3.3.Yapıya Uygulanacak Olan Ana Şok ve Artçı Şok Depremlerinin Elde Edilmesi.....	61
3.4.Depreme Ait Girdi Parametreleri	69
4.BULGULAR	75
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	108
6.KAYNAKLAR.....	111

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün plaka durumlarına göre kuvvet-yer değıştirme parametreleri	33
Tablo 3.1. ModIMKPeakOriented modeline ait girdi parametreleri ve açıklamaları...	43
Tablo 3.2. Üst yapı parametreleri	45
Tablo 3.3. İzolatör parametreleri	47
Tablo 3.4. Deprem parametreleri	48
Tablo 3.5. Uzak faya ait depremlerin özellikleri	62
Tablo 3.6. Yakın faya ait depremlerin özellikleri	63
Tablo 3.7. İvme oranlarını elde etmek için kullanılacak olan katsayılar tablosu	72
Tablo 4.1. İki sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı	77
Tablo 4.2. Üç sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı	88

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Deprem anında izolasyonlu ve izolasyonsuz yapı	4
Şekil 1.2. Jules Touallion'un 1870 yılında tasarladığı sismik izolasyonlu yapı, küresel toplanlarla birbirinden ayrılmış, karşılıklı bakan konkav küresel yüzeylerden oluşan izolasyon sistemi	5
Şekil 1.3. İki serbest dereceli izole sistemin parametreleri	6
Şekil 1.4. Sismik izolasyon sayesinde elde edilen periyot uzamasının ivme üzerindeki etkisi (ivme tepki spektrumu)	6
Şekil 1.5. Sismik izolasyon sayesinde elde edilen periyot uzamasının yer değiştirmeye etkisi (yer değiştirme tepki spektrumu ve yapı yer değiştirmesi)	7
Şekil 1.6. Aktif sistemlerin çalışma prensibi.....	8
Şekil 1.7. Tek eksenli U şekilli metalik sönümleyici	10
Şekil 1.8. U şekilli metalik sönümleyicinin kurulumu.....	10
Şekil 1.9. Deforme olmuş elastomerik sönümleyici	12
Şekil 1.10. Yüksek sönümlü izolatör sisteminin kesit görünüşü.....	14
Şekil 1.11. Vulkanizasyonun oluşturduğu çapraz bağlar	15
Şekil 1.12. a) kurşun çekirdekli kauçuk tipli sismik izolatör b) tek taraflı kuvvet altındaki tepki grafiği c) kurşun çekirdekli kauçuk tipli sistemlerin çok yaylı modeli	17
Şekil 2.1. Sürtünmeli sarkaç tipli izolatör kullanılan bir yapının ve izolatörün kuvvet etkisi altındaki davranışı	20
Şekil 2.2. Sarkaç hareketinin görsel boyutu	21
Şekil 2.3. Sürtünmeli sarkaç tipli izolatör	22
Şekil 2.4. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör (kayıcı yüzeyi yukarı ve aşağı bakan çeşitleri)	22
Şekil 2.5. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün kuvvet etkisindeki çalışması	22

Şekil 2.6. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatöre etki eden yükler ve izolatörün tepkisi.....	23
Şekil 2.7. Çift sürtünme yüzeyli sismik izolatörün durgun ve hareketli hâli	26
Şekil 2.8. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör	27
Şekil 2.9. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün elemanları	27
Şekil 2.10. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin çalışma mekanizması	28
Şekil 2.11. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin kuvvet etkisindeki görünümü	28
Şekil 2.12. $\mu_1 < \mu_2$ Olması durumundaki çift sürtünme yüzeyli izolatörün kuvvet-yer değiştirme grafiği	31
Şekil 2.13. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör.....	33
Şekil 2.14. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün yatay kuvvet altındaki deformasyon grafiği.....	35
Şekil 2.15. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün farklı durumlardaki konumu	35
Şekil 2.16. Ana şok ve artçı şok depremlerinin grafiksel görünümü	38
Şekil 3.1. Artan yer değiştirme altında yapıların temsili yük- yer değiştirme ilişkisi..	41
Şekil 3.2. ModIMKPeakOriented grafik modeli	43
Şekil 3.3. Histeretik eğriyi içerisine alan bir zarf eğrisi modeli	50
Şekil 3.4. Kütleler arasındaki ilişkiye dayalı beta değer aralıkları ve kullanım sayıları..	52
Şekil 3.5. Çift sürtünmeli yüzeyli sarkaç tipli izolatör.....	52
Şekil 3.6. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör.....	52
Şekil 3.7. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç sistemli izolatörün iç yüzeyinin eğrilik yarıçapının dış yüzeyin eğrilik yarıçapına oranının değer aralığı ve kullanım sayıları.....	53
Şekil 3.8. Normalize edilmiş sarkaç tipli izolatörün kuvvet -deformasyon grafiği	54
Şekil 3.9. Çift sürtünme yüzeyli sistemin her ikisi için de seçilen sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları	54

Şekil 3.10. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün iç kısmındaki kayıcı yüzeylerin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları.....	55
Şekil 3.11. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün alt kısmındaki kayıcı yüzeyin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları.....	55
Şekil 3.12. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün üst kısmındaki kayıcı yüzeyin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları.....	56
Şekil 3.13. İki sürtünme yüzeyli izolatörün maksimum yer değiştirmesinin değer aralığı ve kullanım sayıları.....	56
Şekil 3.14. İzolatörün eğrilik yarıçaplarını belirlemek için kullanılan efektif periyot değer aralığı ve kullanım sayısı	57
Şekil 3.15. Yapı periyodunu belirlemek için kullanılan katsayının değer aralığı ve kullanım sayıları	58
Şekil 3.16. Kuvvet etkisi altındaki bir yapının deformasyon grafiği	59
Şekil 3.17. Yapının akma dayanımını belirlemek için kullanılan akma dayanım oranının değer aralığı ve kullanım sayıları	59
Şekil 3.18. Tekrarlı yükler altındaki yapının sünekliğinin değer aralığı ve kullanım sayıları (R_{uy}/u_y)	60
Şekil 3.19. Süneklik değerinin katsayısının değer aralığı ve kullanım sayıları	61
Şekil 3.20. Yapının maksimum kuvvetinin akma kuvvetine oranının değer aralığı ve kullanım sayıları	61
Şekil 3.21. FEMA P695 kayıtlarından alınan uzak faya ait spektral ivme .grafiği.....	65
Şekil 3.22. FEMA P695 kayıtlarından alınan yakın faya ait spektral ivme .grafiği	65
Şekil 3.23. İki yüzeyli sürtünmeli sistem için girdi parametrelerine ait korelasyon ilişkisi	68
Şekil 3.24. Üç yüzeyli sürtünmeli sistem için girdi parametrelerine ait korelasyon ilişkisi	69
Şekil 3.25. Uygulanacak olan ana şokun büyüklük değer aralığı ve kullanım sayısı ..	70

Şekil 3.26. Artçı şokun ve ana şokun yırtılma mesafeleri oranının değer aralığı ve kullanım sayısı	71
Şekil 3.27. Zeminin üst 30 m kısmının sahip olduğu ortalama kayma dalgası hızının değere aralığı ve kullanım sayısı	71
Şekil 4.1. Maksimum yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	79
Şekil 4.2. Maksimum yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (iki yüzeyli).....	79
Şekil 4.3. Maksimum yapı deplasmanı için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	80
Şekil 4.4. Maksimum yapı deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli).....	80
Şekil 4.5. Maksimum izolatör kuvveti için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	81
Şekil 4.6. Maksimum izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (iki yüzeyli).....	81
Şekil 4.7. Maksimum izolatör deplasmanı için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	82
Şekil 4.8. Maksimum izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)	82
Şekil 4.9. Maksimum görelî deplasman oranının 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	83
Şekil 4.10. Maksimum görelî deplasmanında bütün oranların durumu (iki yüzeyli) ..	83
Şekil 4.11. Kalıcı yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	84
Şekil 4.12. Kalıcı yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)	84
Şekil 4.13. Kalıcı yapısal deplasman oranının 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	85
Şekil 4.14. Kalıcı yapısal deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli).....	85
Şekil 4.15. Kalıcı izolatör kuvveti için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	86
Şekil 4.16. Kalıcı izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)	86

Şekil 4.17. Kalıcı izolatör deplasman oranının 1’den büyük olması durumu (iki yüzeyli)	87
Şekil 4.18. Kalıcı izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli).....	87
Şekil 4.19. Maksimum yapısal kuvvet için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli)	90
Şekil 4.20. Maksimum yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)	90
Şekil 4.21. Maksimum yapı deplasman oranının 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için).....	91
Şekil 4.22. Maksimum yapı deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için) .	91
Şekil 4.23. Maksimum izolatör kuvveti için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)	92
Şekil 4.24. Maksimum izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için) ..	92
Şekil 4.25. Maksimum izolatör deplasmanı için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)	93
Şekil 4.26. Maksimum izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için).....	93
Şekil 4.27. Maksimum görelî deplasman oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için).....	94
Şekil 4.28. Maksimum görelî deplasmanda bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)	94
Şekil 4.29. Kalıcı yapısal kuvvet için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için).....	95
Şekil 4.30. Kalıcı yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için).....	95
Şekil 4.31. Kalıcı yapısal deplasmanın oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için).....	96
Şekil 4.32. Kalıcı yapısal deplasman için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için) ..	96
Şekil 4.33. Kalıcı izolatör kuvveti için oranın 1’den büyük olması durumu(üç yüzeyli için).....	97

Şekil 4.34. Kalıcı izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için).....	97
Şekil 4.35. Kalıcı izolatör deplasmanı için oranın 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)	98
Şekil 4.36. Kalıcı izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)	98
Şekil 4.37. Maksimum yapı deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için).....	100
Şekil 4.38. Maksimum yapısal kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)	100
Şekil 4.39. Maksimum izolatör kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için).....	101
Şekil 4.40. Maksimum izolatör deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için).....	102
Şekil 4.41. Maksimum göreceli (relatif) deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için).....	103
Şekil 4.42. Maksimum izolatör deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)	104
Şekil 4.43. Maksimum izolatör kuvveti için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)	105
Şekil 4.44. Maksimum yapı deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)	106
Şekil 4.45. Maksimum yapısal kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)	107

RESİMLER LİSTESİ

Resim

Sayfa

Resim 1.1. 1994 yılındaki Northridge depreminde meydana gelen hasar 3

Resim 1.2. 1994 yılındaki Northridge depreminde meydana gelen yapısal göçme 3



DENKLEMLER LİSTESİ

<u>Denklem</u>	<u>Sayfa</u>
Denklem 1.1. İzolatörlü yapıların göreceli yer değiştirme durumları	6
Denklem 2.1. Sıcaklık katsayısı.....	19
Denklem 2.2. İzolatörün zemine göre yer değiştirmesi	20
Denklem 2.3. Yapının izolatöre göre yer değiştirmesi	20
Denklem 2.4. Yapıya etki eden kuvvet.....	23
Denklem 2.5. Yapının ağırlığı	23
Denklem 2.6. İç bükey elaman ile kayıcı malzeme arasındaki sürtünme kuvveti.....	23
Denklem 2.7. Sinüs değ"eri	23
Denklem 2.8. Yapıya etki eden kuvvet.....	23
Denklem 2.9. İzolatörün rijitliği	24
Denklem 2.10. İzolatör periyodu	24
Denklem 2.11. İzolatörün alt yüzeyine etki eden yatay ve dikey yüklerin elde edilmesi	28
Denklem 2.12. İzolatörün üst yüzeyine etki eden yatay ve dikey yüklerin elde edilmesi	29
Denklem 2.13. İzolatördeki kayıcının alt kısmındaki flanş üzerindeki yer değiştirmesi.	29
Denklem 2.14. İzolatördeki kayıcının üst kısmındaki flanşın üzerindeki yer değiştirmesi	29
Denklem 2.15. İzolatörün alt kısmına etkiyen yatay kuvvet	29
Denklem 2.16. İzolatörün üst kısmına etkiyen yatay kuvvet.....	29
Denklem 2.17. Hareket eden izolatörün eğri yüzeyleri ile yatay yöndeki yer değiştirmesi arasında kalan açılar	29
Denklem 2.18. İzolatörün alt kısmına etkiyen yatay kuvvet	29

Denklem 2.19. İzolatörün üst kısmına etkiyen yatay kuvvet.....	29
Denklem 2.20. İzolatörün toplam yer değiştirmesi.....	30
Denklem 2.21. İzolatöre etki eden kuvvetler	30
Denklem 2.22. İzolatörün alt plakasındaki yer değiştirmesi.....	30
Denklem 2.23. İzolatörün üst plakasındaki yer değiştirmesi.....	30
Denklem 2.24. Yer değiştirmelerin toplanması ile edilen izolatöre ait kuvvet	30
Denklem 2.25. İzolatördeki her iki yüzeyin hareket etmesi sonucu meydana gelen yer değiştirme	30
Denklem 2.26. İzolatörün alt kısmındaki sürtünme katsayısı.....	30
Denklem 2.27. İzolatörün üst kısmındaki sürtünme katsayısı	31
Denklem 2.28. Efektif sürtünme katsayısı.....	32
Denklem 3.1. Beta katsayısının elde edilmesi	51
Denklem 3.2. Eğrilik yarıçaplarının oranı	53
Denklem 3.3. İzolatöre etki eden kuvvetin elde edilmesi.....	54
Denklem 3.4. Efektif periyot yardımıyla eğrilik yarıçapının elde edilmesi	56
Denklem 3.5. Yapı periyodunun efektif izolatör periyodu ve efektif yapı periyodu ile elde edilmesi	57
Denklem 3.6. İzolatörün rijitliği	58
Denklem 3.7. Üst yapının rijitliği	58
Denklem 3.8. Üst yapının akma dayanımının elde edilmesi.....	59
Denklem 3.9. Üst yapı rijitliğine bağlı olarak elde edilen akma deformasyonu	60
Denklem 3.10. Akma yer değiştirmesi ile maksimum kuvvetteki şekil değiştirme arasındaki farkın gamma katsayısı ile akma deformasyonu cinsinden elde edilmesi.....	60
Denklem 3.11. Maksimum kuvvetteki şekil değiştirme ile güç tükenmesindeki şekil değiştirmenin farkının gamma katsayısı ile akma şekil değiştirmesi cinsinden elde edilmesi	61

Denklem 3.12. Maksimum kuvvetin akma kuvvetine oranı	61
Denklem 3.13. Ana şok büyüklüğüne bağlı olarak artçı şok büyüklüğünün elde edilmesi	69
Denklem 3.14. Magnitüd fonksiyonun elde edilmesi	70
Denklem 3.15. Mesafe fonksiyonun elde edilmesi	70
Denklem 3.16. Alan fonksiyonun elde edilmesi	70
Denklem 3.17. Artçı şok ve ana şokun ivmelerinin oranının ln değeri	71
Denklem 3.18. İvmesel oran	72
Denklem 3.19. Artçı ivmesinin yapıya uygulanmadan önce çarpılması gereken katsayı	72
Denklem 4.1. Oran olarak tanımlanan ifadenin açılımı	76

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

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

v_b	: İzolatörün zemine göre yer değiştirmesi
v_s	: Üst yapının zemine göre yer değiştirmesi
u_b	: İzolatörün yer değiştirmesi
u_g	: Zemin yer değiştirmesi
u_s	: Üst yapının yer değiştirmesi
μ_{T0}	: Referans olarak alınan sıcaklık değerindeki sürtünme katsayısı
T_0	: Referans olarak alınan sıcaklık değeri
$\tilde{\mu}_T$	: Yüksek sıcaklıktaki sürtünme katsayısının μ_{T0} 'a oranı
a_t	: Sıcaklık değerleriyle orantılı olan sürtünme katsayısının değişkenlik oranı
h_t	: Sıcaklık değerleriyle orantılı olan sürtünme katsayısının değişkenlik oranı
μ_T	: Herhangi bir sıcaklıktaki sürtünme katsayısı
F	: İzolatöre etki eden yatay kuvvet
F_1	: İzolatörün üst kısmındaki yüzeye etki eden yatay kuvvet
F_2	: İzolatörün alt kısmındaki yüzeye etki eden yatay kuvvet
F_n	: İzolatörün dikey kuvvete tepki kuvveti
F_f	: İzolatörün sürtünme kuvveti
θ	: İzolatörün şekil değiştirme açısı
W	: Toplam yapı ağırlığı
W_s	: Üst yapı ağırlığı
W_b	: İzolatör katı ağırlığı

μ	: İzolatörün sürtünme katsayısı
$\text{sign}(\dot{u})$	: Hızın işaret fonksiyonu
R	: İzolatör yüzeyinin eğrilik yarıçapı
k_b	: İzolatörün rijitliği
k_s	: Üst yapı rijitliği
T_s	: Üst yapı periyodu
T_{eff}	: İzolatörün efektif periyodu
m	: Toplam kütle
m_s	: Üst yapı kütlesi
m_b	: İzolatör katının kütlesi
β	: Üst yapı kütlelerinin toplam yapı külesine oranı
γ	: Akma kuvveti ile maksimum kuvvet arasındaki yer değiştirmenin akmadan sonraki toplam yer değiştirmeye oranı
α	: Üst yapının maksimum kuvvetinin akma kuvvetine oranı
g	: Yer çekimi ivmesi
N_1	: İzolatörün üst kısmındaki yüzeyin tepki kuvveti
N_2	: İzolatörün alt kısmındaki yüzeyin tepki kuvveti
T_1	: İzolatörün üst kısmındaki yüzeyin sürtünme kuvveti
T_2	: İzolatörün alt kısmındaki yüzeyin sürtünme kuvveti
x_1	: İki sürtünme yüzeyli izolatörün üst tabakasının maksimum yer değiştirmesi
x_2	: İki sürtünme yüzeyli izolatörün alt tabakasının maksimum yer değiştirmesi
h	: Kayıcı eleman ile kayıcı yüzeylerin arasındaki yükseklik farkı
u^*	: İzolatördeki her iki yüzeyin hareket etmesi sonucu meydana gelen yer değiştirme
t_{co}	: İki sürtünme yüzeyli izolatörün üst ve alt tabakasının kalınlığı

b	: Kayıcı eleman(lar)ın genişliği
d	: İzolatör tabakalarının maksimum yer değiştirmesi
R_{eff}	: İzolatörün efektif yarıçapı
F_y	: Yapının akma dayanımı
F_r	: Yapının kuvvet altındaki güç tükenmesi durumu
F_u	: Yapının kuvvet altında direnebileceği maksimum yük
R_{uy}	: Yapının akmadan sonra güç tükenmesi durumuna kadar göstereceği yer değiştirme kapasitesi
u_y	: Akma yer değiştirmesi
u_p	: Maksimum kuvvetteki deformasyon ile akma dayanımındaki deformasyon arasındaki fark
u_{pc}	: Güç tükenmesi dayanımındaki deformasyon ile maksimum kuvvetteki deformasyon arasındaki fark
coeffT_s	: Üst yapı periyodu katsayısı
c	: Akma dayanımı (yield ratio)
u	: İzolatörün toplam yer değiştirmesi
M_A	: Artçı şokun büyüklüğü
M_s	: Ana şokun büyüklüğü
V_{s30}	: Zeminin üst 30 m kısmının sahip olduğu ortalama kayma dalgası hızı
R_{up}	: Yırtılma mesafesi
SaM_a	: Artçı şokun spektral ivme değeri
SaM_m	: Ana şokun spektral ivme değeri
R^{AS}_{rup}	: Artçı şok depreminin yırtılma mesafesi
R^{MS}_{rup}	: Ana şok depreminin yırtılma mesafesi
f_{mag}	: Depremin büyüklüğüne ait parametre
f_{dis}	: Depremin mesafesine ait parametre

f_{site}	: Depremın meydana geldiği zemine ait parametre
θ	: Artçı şokun ivmesinin katsayısı
K_e	: Üst yapının elastik rijitliği
K_s	: Üst yapının elastoplastik rijitliği
K_c	: Üst yapının plastik rijitliği
δ_c	: Üst yapının maksimum dayanımındaki deformasyonu
δ_y	: Üst yapının akma dayanımındaki deformasyonu
$R_{effratio}$	: İzolatörün eğrilik yarıçapları arasındaki oran



1. GİRİŞ

Depremler insanların hayatlarına doğrudan etki edebilecek nitelikte ve hayatın akışını değiştirebilecek doğa olaylarıdır. Özellikle insanların yoğun yaşadığı ve önemli yapıların bulunduğu bölgelerde meydana gelen depremler göz önüne alındığında depremin sebep olabileceği olayların boyutu çok büyük olabilecektir ve depremler toplumsal yaşama doğrudan etki edebilecektir. Bu nedenle depremler, yapıların tasarımında göz önüne alınacak olan en önemli faktörlerden biri olmaktadır ve yapısal tasarım mühendislerinin üzerine düşünmesi gereken ve yapının hayatı boyunca belki çok nadiren karşılaşacağı ancak karşılaşması durumunda etkisinin çok fazla olabileceği bir yük durumu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla deprem kuvvetlerinin yapıda oluşturduğu talep değerlerinin gerçeğe olabildiğince yakın bir şekilde belirlenmesi depreme dayanıklı yapıların inşa edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır.

1.1. Deprem Kavramı

Depremler, dünyanın çekirdeğinde bulunan ısı enerjisi sonucunda erimiş halde bulunan maddelerin hareketlerinden dolayı yer kabuğunu şekil değiştirmeye zorlaması ve bunun neden olduğu tektonik hareketlerden dolayı meydana gelen doğa olaylarıdır. Depremlerin araştırılması ve depremlere karşı önlem alınması hususunda yapılan bilimsel çalışmalar birçok meslek grubunu doğrudan ilgilendirmektedir. İnşaat Mühendisliği, Jeoloji, Geoteknik Mühendisliği, Sismoloji vb. alanlar depremlerin mekanizması ve yapılar üzerindeki etkilerini irdelenmesi ile ilgili alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Deprem araştırmaları ülkeden ülkeye tarihsel açıdan farklılık göstermektedir ve Çin’de 3000 yıl kadar eskiye, Japonya’da 1600 yıl kadar, ABD’de 350 yıl kadar eskiye dayanmaktadır (Kramer & Stewart, 2024).

Deprem mühendisliği 20. yüzyıl boyunca inşaat mühendislerinin, jeofizikçilerin ve diğer bazı bilim alanlarının depremlere karşı etkin korunma yöntemlerinin geliştirilmesinde yoğun bir faaliyet gösterdiği alan olarak söylenebilir. 19. yüzyıla kadar şu an iki ayrı meslek grubu olarak var olan Sismoloji ve Deprem Mühendisliği arasında belirgin bir fark bulunmamaktaydı, fakat sonrasında gelişen teknolojiyle birlikte bu iki alanın uğraşları farklılaşmaya başlamıştır.

Dünyanın yer kabuğu ve fiziksel özellikleri incelendiğinde çok karmaşık bir yapının var olduğu söylenebilir. Günümüzde var olan kıtaların dünyanın ilk zamanlarında olmadığı ve dünyanın bir bütün halinde (pangea) bulunduğu bilinmektedir. Fakat ilerleyen zamanlarda

yer kabuğu içerisinde bulunan ısıdan dolayı yer kabuğu harekete zorlanmış ve kıtalar oluşmaya başlamış ve bu durum depremlerin oluşmasına sebep olmuştur. Yer kabuğu üzerinde oluşan kütleler zaman içerisinde birbirini sıkıştırmış ve bu sıkıştırma hatları boyunca faylar meydana gelmiştir. Bu tür yerlerde jeotermal enerjiler ve yanardağ patlamaları fazla olmaktadır (Erdey, 2007).

1.2. Deprem Mühendisliğinin Tarihi Gelişimi

Tarih boyunca meydana gelen depremler mühendislik açısından yapıların daha dayanıklı olarak tasarlanması amacı ile mühendislere yol gösterici olmuştur. Geçmiş depremlerden edinilen bilgi birikim ve tecrübeler yapıların hem tasarım hem de yapım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususları göstermektedir. Sadece tasarımların iyileştirilmesi açısından değil depremler, oluşturulan yönetmelik ve şartnamelerin hazırlanmasında da etkili bir bilgi kaynağıdır.

1933'te Kaliforniya'da meydana gelen deprem, 1977 yılında çıkarılan bina yönetmeliğinin sismik açıdan değişikliğine sebep olan durumlardan biridir. Ayrıca deprem öncesinde yığma yapıların depreme dayanıklı olduğu düşünüldüğünden diğer taşıyıcı sistem elemanlarından meydana gelen göz önüne alınmamakta idi (Erdey, 2007).

1987 yılında Whittier Narrows, depremi özellikle yapının dikey taşıyıcı sisteminde yer alan kolonlar ile yatay yöndeki taşıyıcı sistemlerden olan kirişler arasındaki birleşimin zayıf kaldığının tespit edilip bu bölgelerin sağlamlaştırılması düşüncesinin ortaya çıktığı bir deprem olması açısından önem arz etmektedir. (Erdey, 2007).

1994 yılında olan Northridge Depremi'nde beklenenin aksine yeni yapılan ayrıca lüks sayılabilecek yapılarda ve yollarda hasarlar meydana gelmiştir. Bu yapılar mühendislik açısından özellikle çelik yapılar alanında kaynaklı birleşimler konusunda yeni bir bakış açısı geliştirmenin gerekli olduğunu göstermiştir (Erdey, 2007).



Resim 1.1. 1994 yılındaki Northridge depreminde meydana gelen hasar (Kaynak: Eplett, 1994)

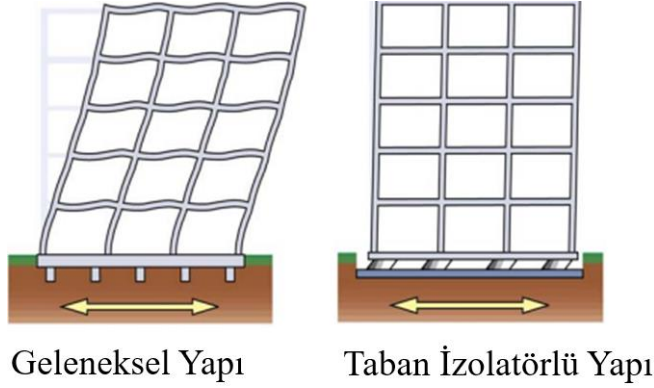


Resim 1.2. 1994 yılındaki Northridge depreminde meydana gelen yapısal göçme (Kaynak: Eplett, 1994)

Özellikle son yıllarda yapıların depreme karşı korunmasında yeni geliştirilen teknoloji ile birlikte farklı yapısal ve yapısal olmayan elemanların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu elemanlar sismik enerjiyi üst yapıya aktarmadan sönmölemeye yarayan elemanlardır. Viskoz enerji sönmöleyiciler bu amaçla kullanılan en önemli teknolojik elemanların başında gelmektedir. Hem yeni yapılan yapılara hem de mevcut ve depreme karşı dayanımı yetersiz olan yapılara uygulanabilen bu sistemlerin son yıllarda kullanımı hızla artmıştır. Gerçekleşen depremlerde bu tür elemanlar ile korunan yapıların iyi bir performans göstermiş olması bu tür enerji sönmöleyici sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır.

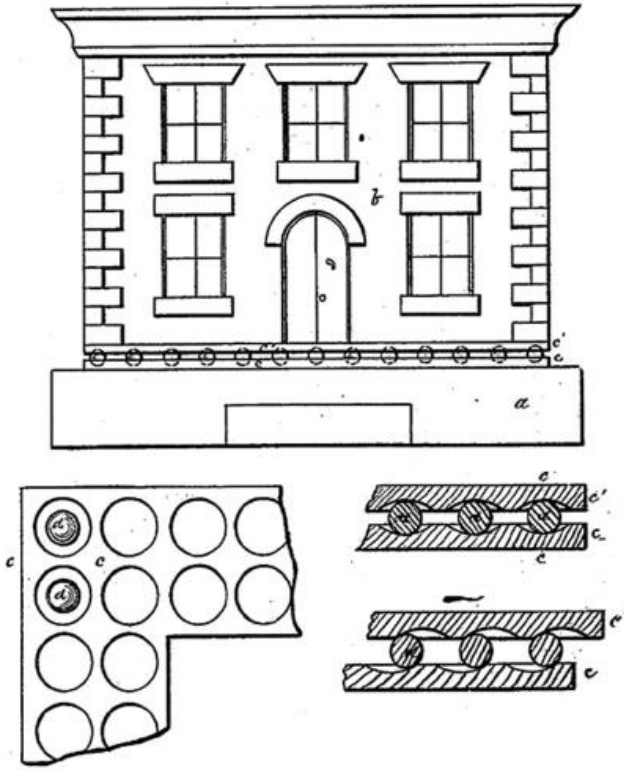
1.3.Sismik İzolatörler ve Kullanım Amaçları

Sismik izolatörler genel anlamda meydana gelen depremlerin yapılara olan etkilerini azaltmak için geliştirilen sistemler olarak tanımlanabilir ve bu sistemlerde kullanılan çok farklı mekanizmalar ve malzemeler mevcuttur. Bu mekanizmaların da asıl amacı deprem etkisini binaya geçmeden kendi üzerine alarak azaltmaktır.



Şekil 1.1. Deprem anında izolasyonlu ve izolasyonsuz yapı (Kaynak: Symans, 2009)

1870 yılında sismik izolatör alanında ilk girişimlerden biri Jules Touallion tarafından gerçekleştirilmiştir. Jules Touallion'un amaçlarından biri deprem etkisi altında binaların hasar almadan veya daha az hasar alarak ayakta kalmasıydı. Buna bağlı olarak sismik izolasyon ile ilgili ilk patent girişiminde bulunmuştur. Tasarımı Şekil 1.1'de gösterilen kayıcı silindirlerden oluşmaktaydı. Sistem hareketsizken küresel topraklar c' ve c'' plakaları arasında durmaktadır. Fakat herhangi bir deprem esnasında tabakalar birbirine göre her iki yüzeyde yatay yönde hareket etmektedir ve üst yapıya aktarılabilecek olan deprem enerjisini azaltmaktadır. Tekrar durgun hâle gelmek için toprakların ağırlıklarından dolayı yer çekimi kuvveti etkisiyle topraklar yerine oturmaktadır. Bu döngü sismik izolatörlerin nasıl çalıştığını göstermesi açısından önemlidir ve bu sistem izolatörler ile ilgili ilk girişimlerden biri olarak sayılmaktadır (Makris, 2019). Jules Touallion tarafından geliştirilen bu sistem iki yüzeyde hareket eden izolatör sistemlerine benzerlik göstermektedir ve sonradan geliştirilen sismik izolatörler sistemlerine de yol gösterici olduğu söylenebilir.

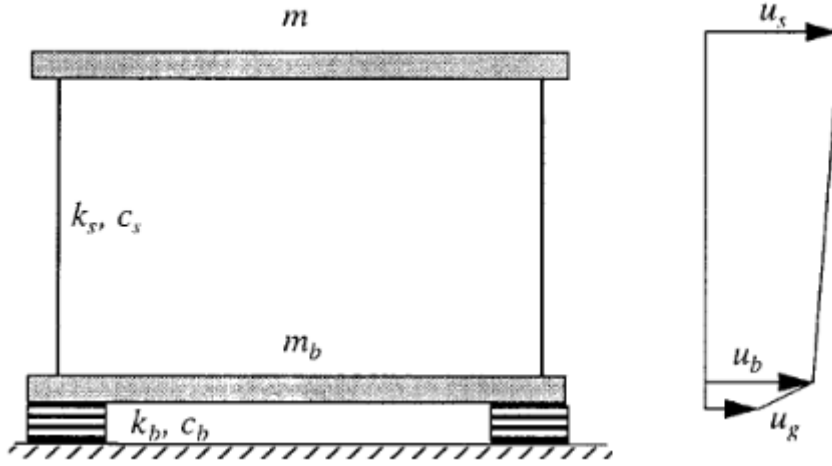


Şekil 1.2. Jules Touallion'un 1870 yılında tasarladığı sismik izolasyonlu yapı, küresel topraklarla birbirinden ayrılmış, karşılıklı bakan konkav küresel yüzeylerden oluşan izolasyon sistemi (Kaynak: Makris, 2019)

1906 yılında Alman Jacob Bechtold binaların ömürleri boyunca karşılaştıkları depremlere daha dayanıklı olabilmeleri için bazı girişimlerde bulunmuştur. Asıl amacı sert zemin üzerine oturan binaların serbestçe hareket etmelerini sağlamaktır (Buckle & Mayes, 1990). Modern anlamda ilk izolatör sayılabilecek eleman sistemi Frank Lloyd Wright tarafından Japonya’da denenmiştir. Wright, Tokyo şehrinde bulunan Imperial Hotel adındaki yapıda sismik izolatör sistemini denemiştir. Bu yapının 8 feet (2.44 m) altında sağlam bir zemin bu zeminin altında 60-70 feet (18.3 m–21.3 m) arasında yumuşak bir zemin bulunmaktadır. Bu altta bulunan zemin üstteki zeminin yumuşak davranmasına neden olmuştur. Wright altta bulunan zemini sık kazıklarla sağlamlaştırmıştır. Bu şekilde yumuşak olan zeminde bulunan kazıklar herhangi bir deprem anına üstten sağlam alttan hareketli olduğu için 1923 yılındaki Kwanto Tokyo depreminde sağlam kalmıştır. Bu şekilde Wright tasarımıyla başarılı olmuştur (Buckle & Mayes, 1990; Calantarients, 1909; Kelly, 1986).

Sismik izolatörlerin davranışını teorik olarak açıklayanlardan biri Prof. Dr. James M. Kelly olmuştur (Kelly, 1993). Prof. Kelly açıklamak için kullandığı tek katlı bir izolatör sistemli binanın çizimi Şekil 1.3’te verilmiştir. Bu sistemdeki “m” üst yapının kütlelerini, “m_b” ise

izolasyon sisteminin üzerindeki taban kütlesini simgelemektedir. Yapının rijitliği ve sönüm katsayısı k_s , c_s ile ifade edilmiştir. Şekil 1.3.'te verilen diğer k_b , c_b ise izolasyonun rijitliğini ve sönüm katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca u_s ve u_b üst yapı ve izolatör katının yer değiştirmelerini ifade etmektedir. u_g ise zemin yer değiştirmesini göstermektedir. Bu parametreler yardımı ile göreceli olarak yer değiştirme miktarını ifade eden aşağıdaki Denklem 1.1 elde edilmektedir.



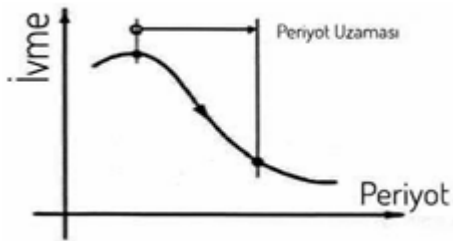
Şekil 1.3. İki serbest dereceli izole sistemin parametreleri (Kaynak: Kelly, 1990)

$$v_b = u_b - u_g$$

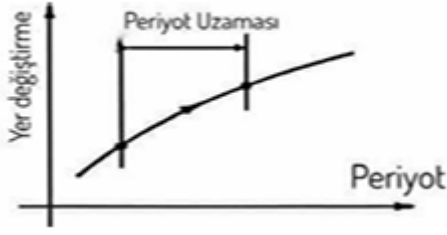
$$v_s = u_s - u_g$$

Denklem 1.1. İzolatörlü yapıların göreceli yer değiştirme durumları

Sismik izolatör sistemlerinin kullanılması yapının deprem etkisi altında vereceği tepkiyi değiştirmekte ve yapıda oluşan talepleri azaltmaktadır. Şekil 1.4 bir izolatörlü yapıya ait spektral ivmenin periyot ile olan ilişkisini göstermektedir. Artan periyot genellikle yapıda azalan spektral ivmelere karşılık gelmektedir. Diğer yandan Şekil 1.5'te verilen grafik ise yer değiştirme ve periyot arasındaki ilişkiyi göstermektedir (İslam vd., 2011).



Şekil 1.4. Sismik izolasyon sayesinde elde edilen periyot uzamasının ivme üzerindeki etkisi (ivme tepki spektrumu) (Kaynak: İslam vd., 2011)



Şekil 1.5. Sismik izolasyon sayesinde elde edilen periyot uzamasının yer değiştirmeye etkisi (yer değiştirme tepki spektrumu ve yapı yer değiştirmesi) (Kaynak: İslam vd., 2011)

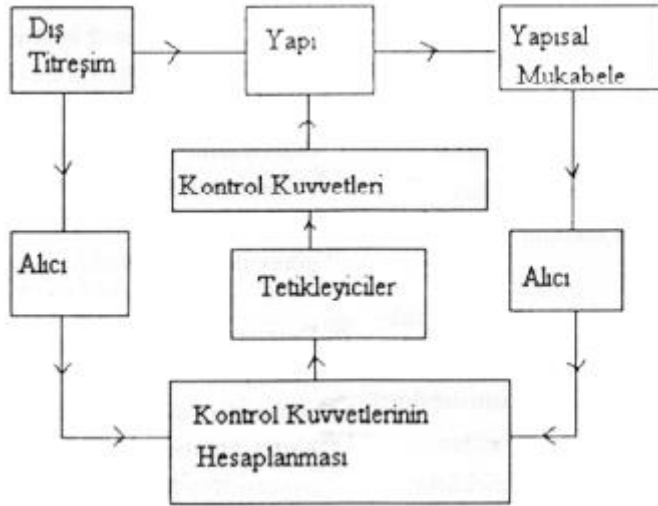
Bu şekillerden görüldüğü üzere periyot ve ivme arasında azalan, periyot ve yer değiştirme arasında ise artan bir ilişki bulunmaktadır.

1.4. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırması

İzolasyon sistemlerinin sınıflandırılması temel olarak üç ana grup halinde olmaktadır. Bütün izolasyon sistemleri esas olarak çalışma mekanizmalarına göre aktif, pasif ve hibrit olarak sınıflandırılmaktadır (Torunbalci, 2003). Verilen bu tür sistemler zeminde meydana gelen deprem hareketini belli bir oranda azaltarak yapıya iletmektedir. Böylece yapı ve yapının üzerine oturduğu izolatörler arasında göreceli bir deplasman meydana gelmektedir (Maldonado-Mercado, 1995).

1.4.1. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri bir sarsıntı esnasında çalışmaları için harici sistemlere ihtiyaç duyan mekanizmalardır. Bu sistemler geri besleme sistemi (feedback) ile çalışan sismik izolasyon sistemlerinin bir türüdür. Geri besleme ise sistemde bulunan sensörler veya harici elemanlar ile sağlanmakta buna bağlı olarak aktif sistemler uyarılmakta ve sarsıntıya karşı tepki vermeleri sağlanmaktadır (Symans & Constantinou, 1999). Bu sistemler etki eden deprem büyüklüğüne göre aktif kontrol sistemi kendini ayarlayarak gelen taleplere karşı sönümleme mekanizması oluşturur. Şekil 1.7’de aktif sistemlerin çalışma prensibi bir akış diyagramı ile gösterilmektedir. Aktif kontrol sistemleri dışarıdan gelen bir enerji ile çalıştığı için bu sistemleri kurmak ve satın almak oldukça maliyetli bir işlemdir. Ayrıca deprem sırasında bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulması ve deprem anında elektrik enerjisinin kesintiye uğrayabilmesi bu tür aktif kontrol sistemlerinin dezavantajı olarak belirtilebilir.



Şekil 1.6. Aktif sistemlerin çalışma prensibi (Kaynak:Samalı vd., 1985; Soong, 1987)

1.4.1.1.Aktif Kütle Sönümleyici Sistemler

Bu sistemlerin temeli pasif kütle sönümleyiciye dayanır. Pasif kütle sönümleyiciden farkı ise sahip olduğu kütlenin hareketi hidrolik pompa (piston), servo motor gibi ekipmanlar tarafından sağlanır. Mevcut yapıya etki eden kuvvetlerden dolayı oluşan titreşimler sisteme bağlanan cihazları uyarak zıt yönde tepki oluşturur. Bu şekilde yapıya etki eden deprem enerjisi sönümlenmektedir.

Ayrıca bu sistemler yüksek yapıli binalarda kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Yüksek binaların dış kuvvetlere karşı olan direnci düşük olduğu için (deprem, rüzgâr vs.) bu sistemler daha çok bu tür yapılarda kullanılmaktadır. Bu sistemler de geri besleme ile çalışmaktadır (Housner vd., 1997)

1.4.1.2.Aktif Taban İzolasyonu

Aktif taban izolasyon sistemleri pasif izolasyon sistemlerinin olumsuz yönlerini gidermek için tasarlanmıştır. Bu sistem pasif izolasyon sistemi ve kontrol sistemlerinin birleşmesinden oluşmaktadır. Aktif taban izolasyon sistemleri bir yapının katları arasındaki yer değiştirmeleri ve zeminin ivme hareketini önemli ölçüde azalttığı için pasif sistemlere bir alternatif olabilmektedir.

1.4.1.3.Doğrudan Kuvvet Kontrolü

Doğrudan kuvvet kontrol sistemleri ön germeli tendondan meydana gelir ve bunlar elektrohidrolik sistemler ile kontrol edilir. Doğrudan kuvvet kontrolü sistemleri ilk olarak yüksek yapılar, büyük su kütlelerinin üzerinde inşa edilen yapılar ve köprüler için analitik

olarak irdelenmiştir. Tendon adındaki elemanın ilk deneysel ortamda incelenmesi ise basit konsol kirişten, kafes sisteminden ve kolonlardan oluşan küçük boyutlu bir model üzerinde olmuştur (Roorda, 1980).

1.4.2. Pasif Kontrol Sistemleri

Bütün gruplar arasında pasif kontrol sistemleri en çok tercih edilen yapısal kontrol sistemlerindendir (Ali & Abdel-Ghaffar, 1995; Ibrahim, 2008; Martinelli & Mulas, 2010; Parulekar & Reddy, 2009; Prucz vd., 1988; Tirca vd., 2003). Pasif kontrol sistemleri çevresel etkiler karşısında özellikle doğal etkenler başta olmak üzere yıllardır hem ekonomik hem de birçok parametreden dolayı ilk tercih edilen seçenektir (Kasai & Kibayashi, 2004; Kasai vd., 2008).

Pasif kontrol sistemleri, aktif kontrol sistemleri gibi dışardan herhangi bir enerjiye (tepkiye) ihtiyaç duymadan çalışan sistemlerdir. Bu sistemler yapının herhangi bir hareketi esnasında etki eden ve bu hareket doğrultusunda çalışan sistemlerdir. Bu kontrol sistemlerinin dışarıdan herhangi bir etki ile enerjisi değiştirilmez. (Housner vd., 1997). Önceden tahmin edilen yapısal tepkiler doğrultusunda tasarlanan sistemlerdir. Böylece herhangi bir kuvvet karşısında ek olarak başka bir müdahaleye gerek yoktur (Habib vd., 2021; Soong & Dargush, 1997).

Pasif kontrol sistemleri yapıda farklı konumlara yerleştirilebilir. Bu tür sistemler binalarda farklı katlara yerleştirebilse de özellikle bodrumlu binalarda bodrum kata yerleştirirler (Wu vd., 2019).

Pasif kontrol sistemleri klasik olarak taban izolasyon sistemleri ve enerji sönümleyici sistemler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır (Farzam vd., 2020; Maldonado-Mercado, 1995; Saaed vd., 2015). Bu sınıflandırmalar aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak verilmektedir.

1.4.2.1. Pasif Enerji Sönümleyici Sistemler

1.4.2.1.1. Metalik Sönümleyiciler

Bu sistemler başlıca beş gruba ayrılmaktadır. Bunlar; şekillendirilmiş bellekli alaşımlı sönümleyiciler, kurşun, çelik, alüminyum ve bakır olarak belirtilebilir. (Javanmardi vd., 2020). Metalik sönümleyicilerin bazı özelliklerinden dolayı izolasyon sistemlerine göre tercih edilmektedir. Özellikle düşük maliyetli olmaları, sıcaklığa karşı olan dirençleri,

Viskoelastik sönümleme sistemleri diğer başlıklar altında belirtilen metalik sönümleme ve sürtünmeli sarkaç sistemli sönümleyici sistemlere oranla yapılarda depreme karşı kullanımı nispeten yenidir (Craig vd., 2007). Yapılan bazı çalışmalardan yapıların enerji yutma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Bir diğer çalışma ise, deprem etkisindeki 13 katlı San Jose’ deki binaya viskoelastik sönümleme sistemleri yerleştirilerek, yapıya etki eden kuvvetin etkisinin %40-%80 oranında azalttığını göstermiştir (Crosby vd., 1994).

1.4.2.1.3. Ayarlı Akışkan Sönümleyiciler

Ayarlı akışkan sönümleyiciler bünyesinde tank bulunan ve bu tankın ya tamamen ya da yarıya kadar su dolu olduğu sistemlerdir. Viskoelastik sönümleyiciler gibi ayarlı akışkan sönümleyiciler de özellikle yüksek katlı binalarda ve rüzgâra karşı önlem alınmak için kullanılmıştır. Ancak viskoelastik sönümleme cihazlarının çalışması için sistemin belirli bir eşik değer kuvvetini aşması gerekmektedir. Bunun aksine ayarlı akışkan sönümleyicilerin çalışması için böyle bir eşik değere gerek duyulmamaktadır. Ayrıca bu sistemlerin başlıca avantajları; maliyet bakımından ucuz olmaları, yeni veya mevcut yapıya uygulanmasının uygun olması, bakımının kolay olması, ayarlanan bir tane cihaz ile farklı yönlerdeki tepki kuvvetini karşılayabilecek olması olarak belirtilebilir. Bu tür özellikler ayarlı akışkan sönümleme sistemlerini öne çıkarmaktadır (Konar & Ghosh, 2023).

Sistemin bünyesinde bulunan kap içerisindeki sıvının hareketinden dolayı sisteme etki eden dış kuvvetlerin etkisini azaltma düşüncesi 19. yüzyılda ortaya atılmıştır (Froude, 1861). Bu sistemin kullanımı ilk olarak gemilerde denenmiştir. Gemilerin gelen dalgalar karşısında dengede durabilmeleri için tasarlanmıştır. (Watts, 1883, 1885). Bu gelişmeden sonra 20. yüzyılda dikdörtgen olan tank U şekilli olarak tasarlanmıştır. Bu şekilde gemilerde tekrar denenmiştir (Frahm, 1911). Ardından 20. yüzyılın sonlarına doğru tasarım yerini dönme hareketiyle kontrol edilebilen içerisi sıvı ile dolu yuvarlak kaptan oluşan sönümleyici olarak geliştirilmiştir (Bhuta & Koval, 1966; Carrier & Miles, 1960).

1.4.2.1.4. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

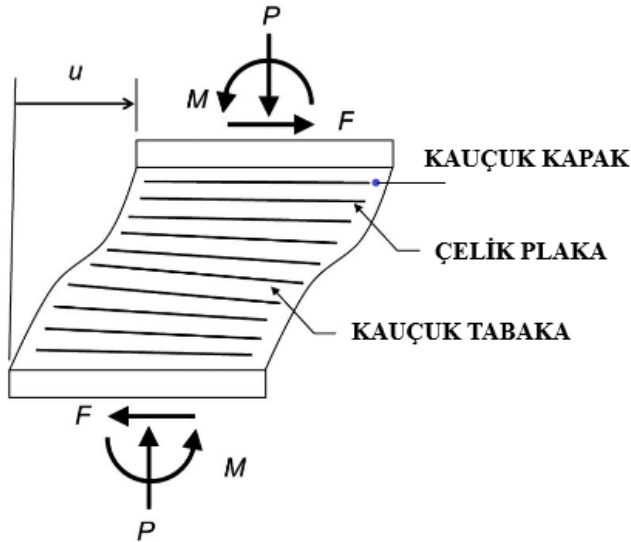
Ayarlı kütle sönümleyiciler dört farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar; klasik (konveksiyonel), sarkaçlı, ayarlı sıvı kolon sönümleyici, çift yönlü ayarlı kütle sönümleyicilerdir. Bu sistemlerin avantajları özellikle klasik (konveksiyonel) ayarlı kütle sönümleyicilerin yüksek katlı binalarda ve birçok yapı türünde kullanılmasıdır. Olumsuz yönleri ise sadece tek ayarlanabilir frekansa sahip olmalarıdır. Bunun sonucunda ilerleyen zamanlarda daha farklı veya daha güçlü etkiler altında özelliğini gösteremezler. Ayrıca klasik sistemlerin

bünyesinde barındırdığı ekipmanların fazla maliyetli oluşu bu sistemin bir diğer olumsuz tarafı olarak söylenebilir. Bunların aksine ayarlanabilir sıvı kolon sönümleyicilerinin maliyet bakımından daha ucuz, yüksek katlı var olan binalarda kullanımı daha uygun, ayrıca geliştirilen çözüm yolları sayesinde yarı aktif sönümleyici sistemlerin grubuna dâhil olabilirler (Kim & Adeli, 2005a, 2005b). Ayarlı kütle sönümleme sistemleri içerdiği sıvı dolu tank sayesinde gerekli durumlarda yangını kontrol etmek için de kullanılırlar (Gutierrez Soto & Adeli, 2013).

1.4.3. Taban İzolasyon Sistemleri

1.4.3.1. Elastomer Sistemler

Bu sönümleme sistemleri üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; düşük sönümlü kauçuk tip izolatörler, yüksek sönümlü kauçuk izolatörler ve kurşun çekirdekli kauçuk tip izolatörlerdir. Elastomerik sönümleme sistemleri, aralarındaki çelik plakalara kauçuk malzemenin yerleştirilmesiyle oluşturulan sistemlerdir (Weisman & Warn, 2012). Bu sistemlerin dış kuvvetler altındaki gereken yatay yöndeki etkiyi karşılaması için yanal yönde belirli bir hareket etmesi gerekmektedir. Bu etkileri karşılaması için plakalar bulunmaktadır. Bu sistemlerin seçimindeki en önemli husu gelen kuvvetlere karşı yatakların davranışdır. Tasarımı da bu hususlar göz önüne alınarak yapılmalıdır (Weisman & Warn, 2012).



Şekil 1.9. Deforme olmuş elastomerik sönümleyici (Kaynak: Kurmann vd., 2015)

Elastomer sistemlerin özellikle kuvvet altındaki kesme ve basınç özellikleri oldukça iyidir. Konut binalarını depremlere karşı korumak amacıyla bu sistemleri kullanmak için geliştirilen matematiksel çıkarımlar bu tür yapıların tasarımında kullanılmaktadır. Bu

matematiksel kuramlar bir yapının kuvvet–şekil deęiřtirme grafięini matematiksel olarak ifade etmektedir. Zamanla meydana gelen elastomerik sistemlerin yzeyleri dūřunūlduęunden daha fazla gerilme ve Őekil deęiřtirme yapabileceęi gōz űnūnde bulundurulup ona gōre tasarım yapılmalıdır (Kumar vd., 2014).

1.4.3.2.Yūksək Sōnūmlū Kauęuk Tip İzolatōrler

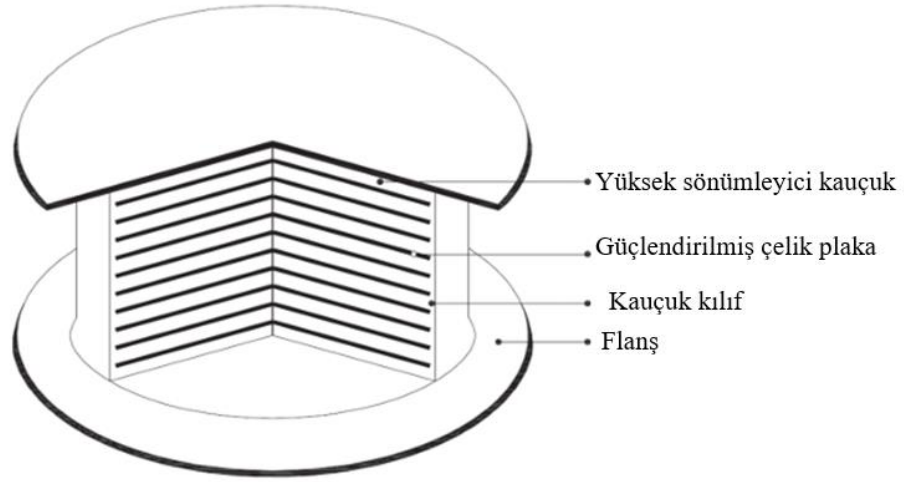
Kauęuk tip izolatōrler būnyesinde bulunan ēelik tabakalar arasına yūksək basınē ve yūksək sıcaklık ile sıkıřtırılan kauęuk malzemelerden oluřmaktadır (Choun vd., 2014; Pecchillo, 2018).

Dięer elastomerik sōnūleme sistemleri ile yūksək sōnūmlū izolatōrlerin sōnūleme miktarı kıyaslandığında yūksək sōnūmlū izolatōrler ēok daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir (Ozkaya vd., 2011). Yūksək sōnūmlū izolatōrler basit yapılarının getirdięi űzelliklerinin yanı sıra yūksək enerji yutma kabiliyetleri, ēevre dostu ve dayanıklı mekanik űzelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Ozkaya vd., 2011).

Geliřen teknoloji sayesinde normal kauęuk tipli izolatōr ile bu kauęuk maddesinin geliştirilmesiyle elde edilen yūksək sōnūmlū sismik izolatōrler karřılařtırıldığında yūksək sōnūmlū kauęuęun normal kauęuęa gōre yūzde yirmi daha fazla sōnūleme oranı elde edilmiřtir. Yine kurřun ēekirdekli izolatōrler ile yūksək sōnūmlū kauęuk izolatōrler birbiri ile karřılařtırıldığı zaman tasarlanan herhangi bir deprem būyūklūęunden daha būyūk deprem karřısında izolatōrūn hasar gōrmesi sonucu kurřunun parēalanarak daęılma olasılıęı olduęu iēin bu durumda da yūksək sōnūmlū kauęuk tercih sebebi olabilir (Chen vd., 2022). Fakat bunların yanı sıra yūksək sōnūmlū kauęuk tip sōnūleme sistemlerinin birēok avantajın yanında bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantaj durumlarını etkileyen sebeplerden biri veya bařlıca sebebi sıcaklık faktōrū olarak karřımıza çıkmaktadır. Sıcaklığın bu sistemler űzerindeki etkileri;

- Kauęuk viskoelastik bir malzeme tūrevi olduęu iēin ani sıcaklık deęiřimlerden ēok ēabuk etkilenmektedir.
- Herhangi bir sūrtūnmeden kaynaklanan sıcaklık artmasından dolayı kauęukta esneklik oluřmaktadır.
- Yūksək sıcaklığın yanı sıra meydana gelen dūřuk sıcaklık etkisi ile kauęuk būzūlūp kristal bir yapıya dōnūřmektedir.

Yukarıda sıralanan sıcaklık etkileri yüksek sönümlü kauçuk izolatörleri olumsuz yönde etkilemektedir (Li vd., 2021). Şekil 1.10 yüksek sönümlü bir kauçuk izolatörün iç mekanizmasını göstermektedir.

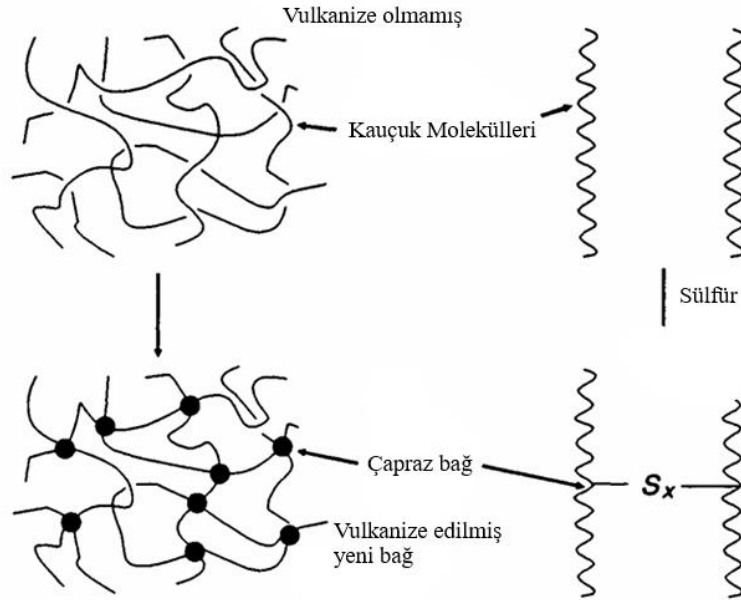


Şekil 1.10. Yüksek sönümlü izolatör sisteminin kesit görünüşü (Kaynak: Markou & Manolis, 2016)

Yüksek sönümlü sismik izolatörler 20 °C ve 40 °C sıcaklık aralıklarında deneye tabi tutulmuştur (Shen vd., 2012). Deney düzeneği 12 MPa gerilme oluşturacak bir düşey yük ve %100 yatay kesme etkisi altında izolatör performansını gözlemlemek amacıyla tasarlanmıştır. Deney sonucunda izolatör sisteminin deprem etkisi altındaki sönümleme miktarının ve düşey rijitlik özelliğinin önemli derecede azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yüksek sönümlü kauçuk izolatörün mekanik özelliklerini bir derece kaybettiğini de söylemek mümkündür. Bu oranların bulunmasında deneye tabi tutulan izolatör 14 gün aralıklarla 100 °C altında teste sokulmuştur (Shen vd., 2012). Bu yüzden bu yüksek sönümlü kauçuk sistemleri bulunduğu bölgenin sıcaklık değişimleri (farkları) bu sistemlerin çalışma mekanizmalarını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sistemler üzerine gelen yatay kuvvetlere karşı gösterdiği salınım hareketi sonucunda yüzeyinde oluşan sıcaklık etkisiyle zamanla ilk başta tasarlanan dayanıklılığını gösteremeyecektir. Bu sorun ise bu sistemlerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Tachibana & Li, 1996).

Bu sistemlerin sıcaklıktan daha az etkilenen malzemeler ile geliştirilmesi bunların davranışını önemli ölçüde iyileştirecektir (Chen vd., 2022). Ayrıca özellikle kauçuk malzemesinin kullanıldığı sismik izolatörlerde “vulkanizasyon” işlemi kauçuk esaslı sismik izolatörler için önemli bir işlemdir. Farklı tipteki vulkanizasyon hızlandırıcıları ve bu işlem için seçilen yardımcıları kauçuk malzemesinin mekanik ve sönümleme etkisini

etkilemektedir (Chen vd., 2022). Vulkanizasyon işlemi ilk olarak Charles Goodyear tarafından öne atılmış ve 1841 yılında Amerika’da oluşturulan bir yöntemdir. Vulkanizasyon işlemi daha çok elastomerik ve kauçuk gibi petrolden elde edilen materyaller için tercih edilmektedir. Elastomerik ve kauçuk gibi maddeler belirli bir kuvvet altında özellikle fazla yüklerde elastik şekil değiştirme kabiliyeti az olduğu için vulkanizasyon işlemi yük altında formunun bozulmadan işlevine devam etmesini sağlamaktadır. Bu dönüştürme kısmı çoğunlukla çapraz bağlı bir ağın oluşturulması ile meydana gelmektedir (Şekil 1.11) (Coran, 1994).



Şekil 1.11. Vulkanizasyonun oluşturduğu çapraz bağlar (Kaynak: Coran, 1994)

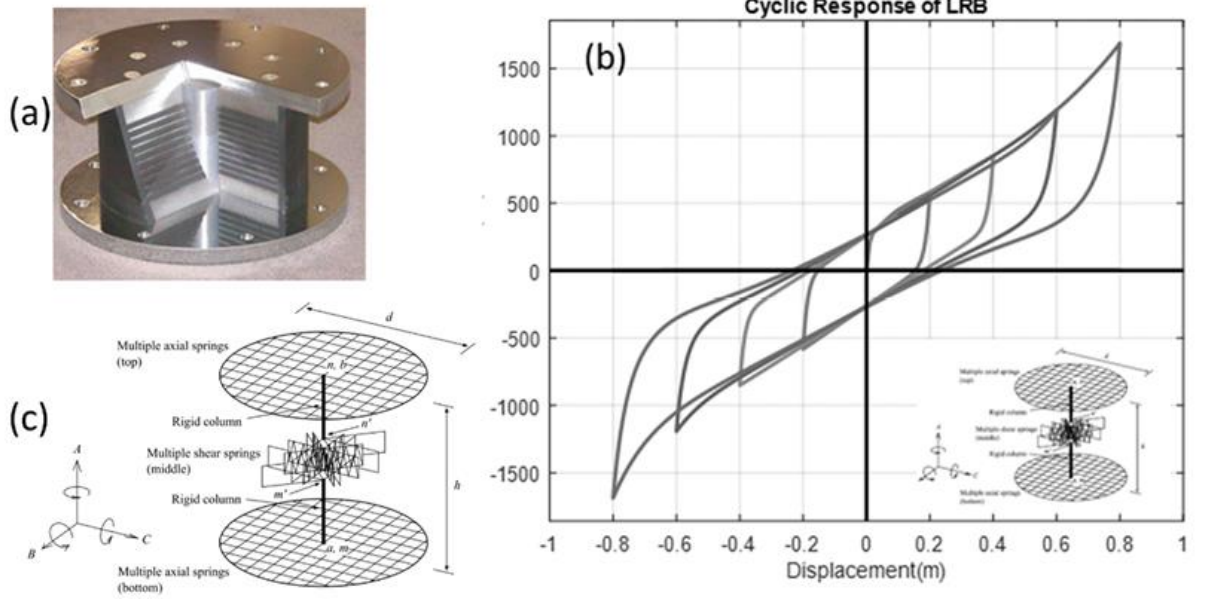
1.4.3.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Tip İzolatörler

Kurşun çekirdekli kauçuk tipli izolatörler 1970 yılında Yeni Zelanda’da William Henry Robinson tarafından icat edilmiştir. Daha sonra kurşun çekirdekli kauçuk tip izolatörler dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Constantinou vd., 2007; Robinson, 1982).

Kurşun çekirdekli kauçuk tipli izolatörler yapının üst katlarını temelden gelen hareketlere karşı korumak amacıyla günümüzde yaygın olarak kullanılan izolatör sistemlerinden biridir. İzolatörün merkezinde kurşun bir çekirdek yerleştirilmesi, kauçuk ve çelik plakların birleştirilmesiyle elde edilmiştir (Robinson, 1982). Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yapılarındaki elemanlar sayesinde gerekli olan yatay esneklik, gelen kuvveti eşit şekilde

dağıtma, düşey rijitlik, kuvvet etkisi geçtikten sonra geri ilk haline dönme gibi birçok özelliği barındırmaktadır. Bu özelliklerinin sağladığı avantajlarından dolayı kurşun çekirdekli kauçuk tip izolatorlerin kullanımı yaygındır (Nagarajaiah & Sun, 2001; Nagarajaiah & Xiaohong, 2000). Bu sistemlerin merkezinde bulundurduğu kurşun plaka sayesinde yapıya etki eden küçük deformasyon talebi oluşturan rüzgarlara ve depremlere karşı ilk başlangıç rijitliği sayesinde kesme deformasyonuna karşı tepki gösterir.

Aslında kurşun çekirdekli kauçuk tipli izolatorlerin üretimi kauçuk tipli sönümleme sistemlerinin aynısıdır. Fakat bu iki farklı tip sönümleme cihazları arasındaki fark kauçuk tipli izolator sistemlerinin ortasına kurşundan yapılan bir plaka yerleştirilmiş olmasıdır. Kurşun çekirdekli kauçuk tipli sönümleme ekipmanları bünyesinde bulundurduğu kurşun tabaka sayesinde diğer kauçuk tipli izolatorlere oranla ortalama sıcaklıklarda ve dışardan gelen düşük seviyedeki kuvvetlere karşı daha iyi bir davranış sergilemektedir. Ayrıca kurşun çekirdek sayesinde bu izolatorler yükü üniform dağıtır ve plastik deformasyonların önüne geçmek için karakteristik bir direnç uygular. Kauçuk tipli izolatorlerde meydana gelen ve tekrarlanan dış kuvvetlerden dolayı oluşan deforme olma olasılığı kurşun çekirdek sayesinde bu sistemlerde gözlenmez. Çünkü kurşun çekirdek istikrarlı bir davranış göstererek plastik deformasyonun önüne geçmiş olmaktadır. Şekil 1.12’de bu sistemlerin kesit görünüşü (iç yapısı ve çok yaylı modeli) ve tek taraflı döngüsel tepkisinin grafiği verilmiştir (Yenidogan, 2021).



Şekil 1.12. a) kurşun çekirdekli kauçuk tipli sismik izolatör b) tek taraflı kuvvet altındaki tepki grafiği c) kurşun çekirdekli kauçuk tipli sistemlerin çok yaylı modeli (Kaynak Yenidogan, 2021)

Kurşun çekirdekli sönümleyicilerin akma mukavemeti birçok etkene bağlıdır. Bunlardan bazıları; merkezinde bulunan kurşunun geometrisi, etki eden eksenel kuvvetin büyüklüğü, izolatöre etki eden dış kuvvetlerin devamlılığı, sönümleyici yüzeyin yanal eksenel gerilmesi gibi faktörler sönümleyicinin merkezinde bulunan kurşunun akma dayanımında etkilidir (McVitty & Constantinou, 2015).

Diğer bir metot olarak da kurşun çekirdeğin yerleştiği plakadan biraz daha uzun olması durumunda üstte ve altta bulunan plakaların kesilen kurşun çekirdeğe iyice temas ederek akma mukavemetini artıracakı belirtilebilir (Constantinou vd., 2011).

2. SÜRTÜNMELİ SARKAÇ TIPLİ İZOLATÖR

İzolator sistemlerinden en yaygın olarak kullanılanları elastomer ve sürtünmeye dayalı izolatörlerdir. Bu tip sistemler deprem etkisi altında binaya aktarılan enerjiyi sönümleyerek yapıda meydana gelen deprem taleplerinin azaltılmasını sağlar.

Sürtünmeye dayalı sistemler iki farklı metalik yüzeyin birbiri ile sürtünmesi sayesinde deprem enerjisini sönümler. Sürtünme yüzeyi sayısına, sürtünen yüzeylerin eğrilik yarıçapına ve izolatörler üzerine etki eden aksel yük değerine bağlı olarak bu sistemlerin davranışı değişiklik göstermektedir.

Bu sistemin harekete geçmesi için gelen yanal kuvvetin eğrisel yüzeyin sürtünme kuvvetini aşması gerekmektedir. Bu şekilde yapı eğrisel yüzeyde harekete başlar. Bu hareket deprem boyunca ileri geri devam eder ve deprem sonunda az bir kalıcı deplasman olsa dahi sistem büyük oranda tekrar eski haline gelir. Genel olarak eğrilik yarıçapı arttıkça izolatörde meydana gelen kalıcı yer değiştirme değerleri de artış göstermektedir ve yapı ağırlığı arttıkça bu değer azalmaktadır (Mokha vd., 1991). Sistemde bulunan eğrisel eleman sayesinde dışarıdan gelen kuvvetleri üniform olarak dağıtır. Sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin bir diğer avantajı ise yapının herhangi bir zamanda veya kuvvet etkisi altındaki burulmayı engelleme özelliğidir. Bu durum izolatörün yatay rijitliğinin ve sürtünme kuvvetinin yapıdan izolatöre etki eden dikey kuvvet ile doğru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla planda düzgün dağılmış bir kütle olmasa dahi bu izolatörler burulma değerini en aza indirir. Yapının kütle merkezi ile sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlere bağlı olarak hesaplanan rijitlik merkezi birbirine çok yakın bir konumda bulunur ve burulma engellenmiş olur (Landi vd., 2016). Bu sistemler diğer sönümleme sistemlerinin yanı sıra yüksek stabilite özelliği ve herhangi bir yatay kuvvete karşı gösterdiği tepki hassasiyetiyle öne çıkmaktadır (Mokha vd., 1991).

Zayas ve Mahin (1987) tarafından sürtünmeli sarkaç sistemlerini kontrol etmek için yapılan bir çalışmada sürtünmeli sarkaç sistemlerinin davranışı ortaya konmuştur ve bu deney iki katlı bir yapı üzerinde gerçekleştirilen bir deneydir (Zayas & Mahin, 1987).

Sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerde düşey yüklerin etkisi ve düşey hareketler izolatör seçerken dikkat edilmesi gereken konulardandır (Calvi vd., 2004). Yapılara etki eden düşey yöndeki maksimum yer ivmesi değerinin fazla olması yapıda önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlardan bazıları; basınç anında yapıdaki kolonlarda olası gevrek kırılma ve çekme kırılması meydana gelmesi, betonarme kolon elemandaki beton ve çelik

malzemelerinin arasındaki aderans kaybı ve yatay taşıyıcı sistemlerde (kirişlerde) olası plastik mafsallardır. Ayrıca dış kuvvetlerden doğan ve sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerde meydana gelen çekme gerilmelerinin büyük olması izolatörün çalışması bakımından problem oluşturmaktadır. Bu durumda sorun olan diğer bir husus ise kayıcı kısımların yerinden çıkma ihtimalidir. Dolayısıyla yapılardaki düşey hareket çok önemlidir ve yapıların ani hasarına yol açabilir. (Diotalleve & Landi, 2006; Diotallevi vd., 2006; Mazza, 2015; Mazza & Vulcano, 2008, 2012; Mazza vd., 2012; Papazoglou & Elnashai, 1996).

Sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin kayıcı yapılarından dolayı herhangi bir hareket esnasında kayıcı yüzeyde oluşan sıcaklık etkisi sistemin çalışmasında ve vereceği tepkide doğrudan etkilidir. Bu sıcaklık değerinin tam olarak ölçülmesi pek olası değildir. Ama kayıcı yüzeye yerleştirilen bir cihaz sayesinde bu sıcaklık değeri ölçülmeye çalışılmıştır (Wolff, 1999).

Yapılan bir araştırmada sürtünme katsayısının sıcaklık değerine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bu iki değer birbirini ters orantılı olduğu söylenebilir. Varılan bulguya göre kayıcı yüzeydeki sıcaklık değeri -40 °C değerinden +20° C değerine çıktıktan sonra sürtünme katsayısı hızlı bir şekilde düşmektedir fakat bu değerden sonra düşme hızı oldukça yavaşlamaktadır. En son sistemin kayıcı yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değeri +250 °C'ye çıktığında sürtünme katsayısı sabit bir şekilde devam etmektedir (Constantinou vd., 2007).

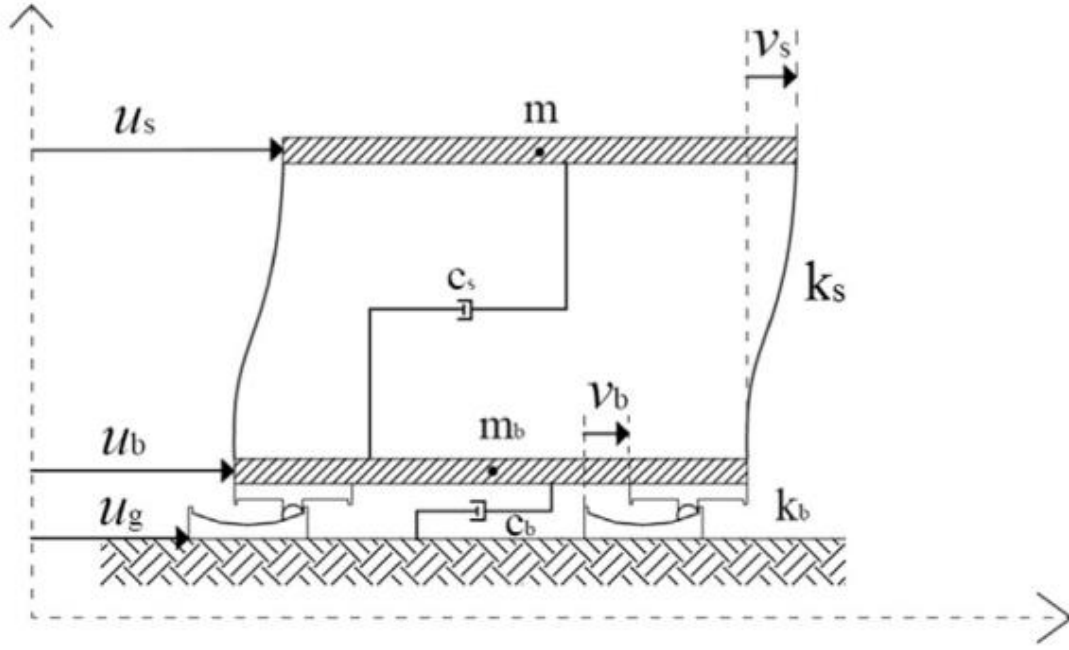
Sıcaklık ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki formülize edilmiş ve bu formül Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\mu(T) = \mu_{T_0} \times \left(\tilde{\mu}_T + (1 - \tilde{\mu}_T) a_T^{h_T(T-T_0)} \right) = \mu_{T_0} \times m(a_T^{h_T T} + n)$$

Denklem 2.1. Sıcaklık katsayısı

Buradaki ifadeler şu şekilde açıklanabilir; μ_{T_0} , T_0 referans olarak alınan sıcaklık değerindeki yüksek hızdaki sürtünme katsayısıdır, $\tilde{\mu}_T$ ifadesi yüksek sıcaklıktaki, örneğin 250 °C derece sıcaklıktaki, sürtünme katsayısının μ_{T_0} 'a oranıdır, a_t ve h_t değerleri sıcaklık değerleriyle orantılı olan sürtünme katsayısının değişkenlik oranlarıdır, m ve n değerleri a_t , h_t , μ_T ve T_0 değerlerinin değişkenlik fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Sarlis & Constantinou, 2013)

Sürtünmeli sarkaç tipli izolatör kullanılan bir yapıda herhangi bir kuvvet etkisi altındaki hem yapının hem de izolatörün davranışları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Sürtünlmeli sarkaç tipli izolatör kullanılan bir yapının ve izolatörün kuvvet etkisi altındaki davranışı (Kaynak: Naeim & Kelly, 1999)

$$v_b = u_b - u_g$$

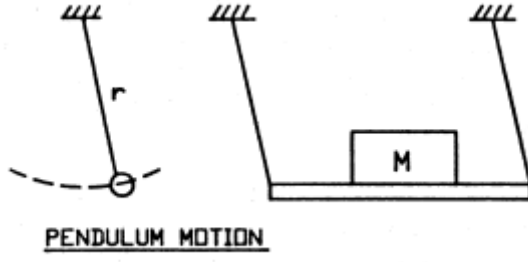
Denklem 2.2. İzolatörün zemine göre yer değiştirmesi

$$v_s = u_s - u_b$$

Denklem 2.3. Yapının izolatöre göre yer değiştirmesi

Denklem 2.2, Denklem 2.3'te ve Şekil 2.1'de verilen parametreler ise şu şekilde açıklanabilir; m üst yapı kütlesi, m_b , izolatör katının kütlesi olarak belirtilmektedir. u_s üst yapının yer değiştirmesi ve u_b alt yapının yer değiştirmesi olarak tanımlanırken u_g ise zeminin yer değiştirmesi olarak ifade edilmektedir. k_s yapının rijitliği, k_b ise sürtünlmeli sarkaç tipli izolatörün rijitliğidir. c_s yapının sönüm katsayısı, c_b ise izolatörün sönüm katsayısı olarak tanımlanmaktadır (Landi vd., 2016; Naeim & Kelly, 1999).

Bu tip izolatörlerin davranışı sarkaç hareketine benzemektedir ve bu bağlamda açıklanabilir. Bu oluşan hareket şeması Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Sarkaç hareketinin görsel boyutu (Kaynak: Low vd., 1989)

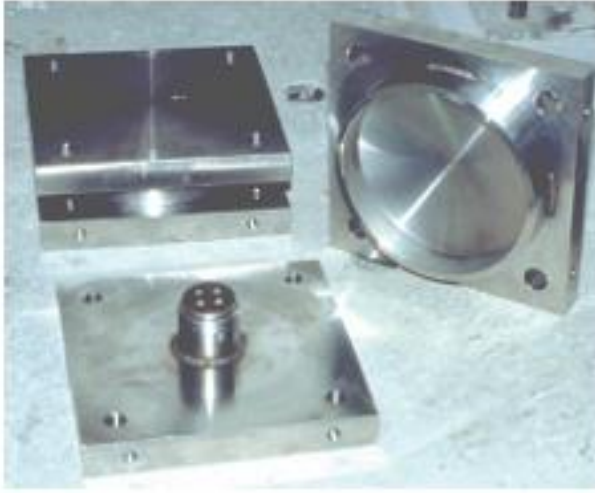
Sürtünme tipindeki izolatörler ortaya çıkan sarkaç hareketine bağlı olarak üç ana gruba ayrılabilir (Gong & Zhou, 2010).

1. Tek sürtünmeli sarkaç tipli sönümleyiciler
2. İki yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli sönümleyiciler
3. Üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli sönümleyiciler

Bunlara ek olarak ayrıca dört yüzeyli sürtünme tipli izolatörler de mevcuttur (Lee & Constantinou, 2016).

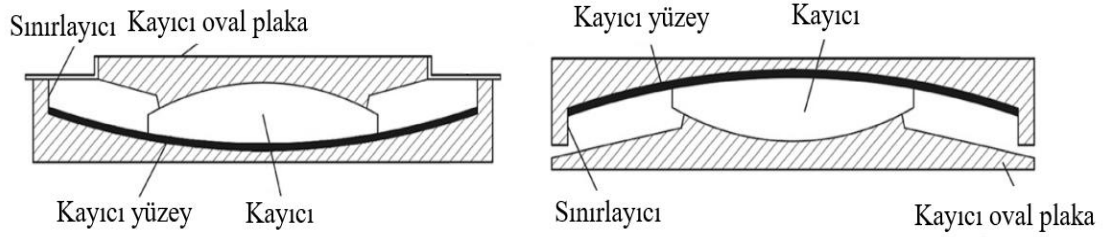
2.1. Tek Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli İzolatörler

Bu tip izolatörler ilk olarak Victor A. Zayas tarafından 1987 yılında ortaya çıkarılmıştır (Zayas & Mahin, 1987). İzolatör paslanmaz çelikten ve tek tarafı eğik yüzey olan bir sistemden oluşmaktadır. Sistemdeki eğik yüzeyli eleman ve üst kısmındaki kayıcı, teflon adı verilen sağlam bir malzemeden üretilmiştir. Bu teflon malzemesi iki yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltarak, iki yüzey arasında oluşacak olan ısıyı engellemektedir. Bu tip izolatörler tasarım ve kullanım olarak kauçuk tipli izolatörlere göre bazı avantajlara sahiptir. İzolatörü oluşturan malzemelerin zamanla özelliklerini koruması yani dayanıklılığı bu tip izolatörlerin avantajlarından (Nguyen vd., 2018). Ayrıca geri merkezlenme durumu da deneysel olarak irdelenmiştir ve bu konuda yapılan çalışmalar merkezlenme özelliğinin de iyi olduğunu göstermiştir (Zayas vd., 1996; Zayas vd., 1993). Geri merkezleme durumu iki farklı bileşenin etkisi ile meydana gelmektedir. Bunlar yapının ağırlığı ve yüzeyin eğrilik yarıçapından dolayı oluşan kuvvet ile sürtünmeden dolayı meydana gelen kuvvet olarak belirtilebilir. Şekil 2.3 tek eğrilik yüzeyine sahip bir sürtünmeli izolatörü göstermektedir.



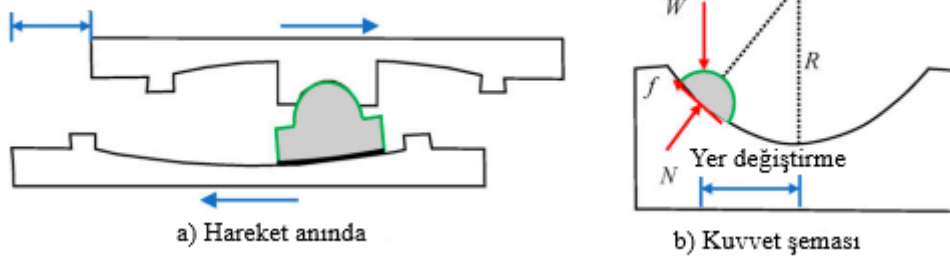
Şekil 2.3. Sürtünmeli sarkaç tipli izolatör (Kaynak: Constantinou vd., 2007)

Tek sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün çalışmasının şematik gösterimi, durgun haldeki görünümü Şekil 2.4'te ve hareket esnasındaki görünümü Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da verilmektedir.

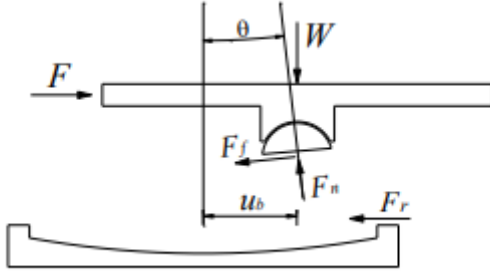


Şekil 2.4. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör (kayıcı yüzeyi yukarı ve aşağı bakan çeşitleri) (Kaynak: Xu vd., 2025)

Yer değiştirme



Şekil 2.5. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün kuvvet etkisindeki çalışması (Kaynak: Xu vd., 2025)



Şekil 2.6. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatöre etki eden yükler ve izolatörün tepkisi (Kaynak: Nguyen vd., 2018)

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

Denklem 2.4. Yapıya etki eden kuvvet

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

Denklem 2.5. Yapının ağırlığı

Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'te; F_n eğik yüzeyin kayıcı elemana uyguladığı kuvvet, F_f sürtünme kuvveti ve θ dönme açısı olarak tanımlanmaktadır. F yapıya etki eden dış kuvvet, W ise yapının izolatöre uyguladığı ağırlık F_r geri çağırıcı kuvvettir.

$$F_f = \mu F_n$$

Denklem 2.6. İç büküyen elaman ile kayıcı malzeme arasındaki sürtünme kuvveti

$$\sin \theta = \frac{u}{R}$$

Denklem 2.7. Sinüs değ"eri

Yukarıdaki Denklem 2.6 ve Denklem 2.7 olmak üzere iki denklem elde edilmektedir. Bu denklemler sürtünmeli sarkaç izolatörlerinin davranışını açıklamada kullanılmaktadır.

Yer değiştirme “ u ”nun izolatörün yarıçapı “ R ” ye olan oranının küçük olmasından dolayı; dönme açısı “ θ ” çok küçük değerlere tekabül etmektedir. Bundan sebeple $\mu \sin \theta = 0$ ve $\cos \theta = 1$ olacağından Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 birleştirilerek aşağıdaki Denklem 2.8 elde edilir.

$$F = \frac{W}{R} u + W \mu \text{sign}(\dot{u})$$

Denklem 2.8. Yapıya etki eden kuvvet

Denklem 2.8'deki (W_u/R) eşitliği yer değiştirme değerinden dolayı meydana gelen kuvvet olarak açıklanabilir. Dolayısıyla yer değiştirme değerinin katsayısı rijitliği ifade etmektedir. Bunun sonucunda tek sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin yatay yöndeki rijitliği k_b bağıntısı; Denklem 2.9'da gösterilmektedir.

$$k_b = \frac{W}{R}$$

Denklem 2.9. İzolatörün rijitliği

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{m}{k_b}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{gk_b}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Denklem 2.10. İzolatör periyodu

Denklem 2.10 izolatör periyodunun elde edilmesi için gerekli olan ifadeyi göstermektedir.

Burada ifade edilen eğrilik yarıçapı efektif olarak sistem içerisinde yer alan elemanların yüksekliklerine bağlı olarak bulunan yarıçaptır. Dolayısıyla eğri yüzeyin eğrilik yarıçapından kayıcı elemanın yüksekliğinin yarısı çıkarıldıktan sonra elde edilen değerdir. İç bükey plakanın eğrilik yarıçapı hem yapının hem de izolatörün periyodunu ve rijitliğini belirlemede önemli bir parametredir. İzolatörün deprem enerjisini yutma kapasitesi iç bükey plaka ile kayıcı elemanın arasındaki sürtünme kuvvetinin katsayısına bağlıdır (Gong & Zhou, 2010).

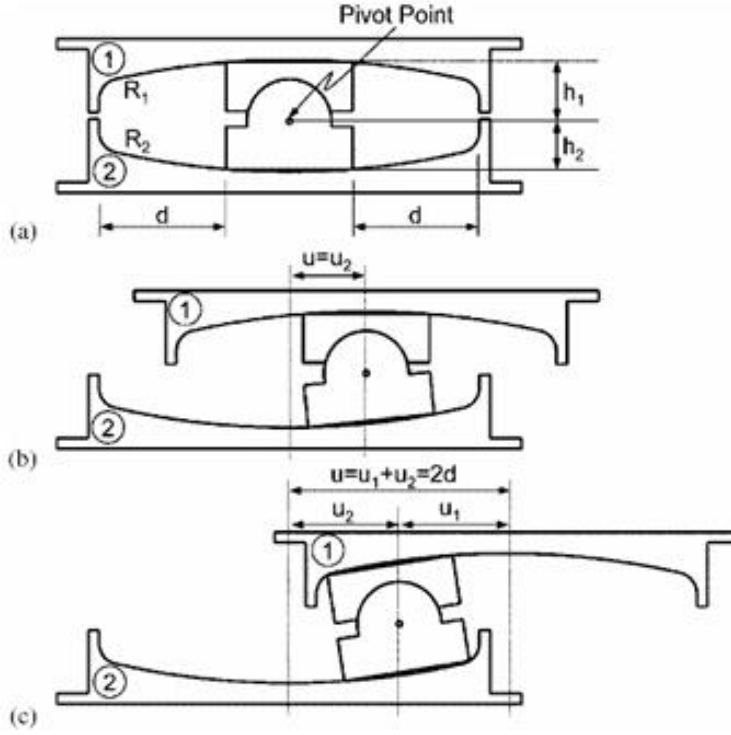
Bu iki eleman arasındaki sürtünme kuvveti katsayısını düşürmek yapıya etki eden kesme kuvvetini azaltmak için çok önemlidir. Fakat sürtünme kuvveti katsayısını azaltmak yapıya etki eden kuvvetlere karşı izolatörün direncini azaltmak anlamına gelmektedir ve bu da sürtünmeli sönümleme sistemlerinin çalışmasına ters düşmektedir (Fenz & Constantinou, 2008c). Bunun bir sonucu olarak ise yapıda meydana gelen taban yer değiştirmelerinde artış meydana gelmektedir.

2.2.Çift Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli Sönümleyiciler

Bu tip sönümleyiciler tek sürtünmeli sönümleyicilerin gelişen teknolojiyle ve yapıların daha fazla depremlere karşı koyması amaçlanarak geliştirilmiştir. Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin çalışma şekli ve yapısında bulunan bileşenler tek sürtünme yüzeyli sarkaç tipli sismik izolatörlere oldukça benzerdir (Deng vd., 2010).

Çift yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin tek sürtünmeli sistemlere göre farkı hem altta hem üstte kayıcı (oval) plakanın bulunmasıdır. Bu iki plaka sayesinde kuvvetten dolayı yapıda oluşan yer değiştirme miktarı tek sürtünmeli sistemlere göre oldukça farklı olup değeri azaltmaktadır. Yapının yer değiştirme miktarındaki azaltmayı ise bünyesinde bulunan bu iki plakanın birbiriyle uyum içerisinde hareket ederek yatay yöndeki hareket kapasitesini artırarak yapmaktadır. Bu hareket kapasitesi tek sürtünmeli sistemlere oranla iki kat daha fazladır (Xu vd., 2025).

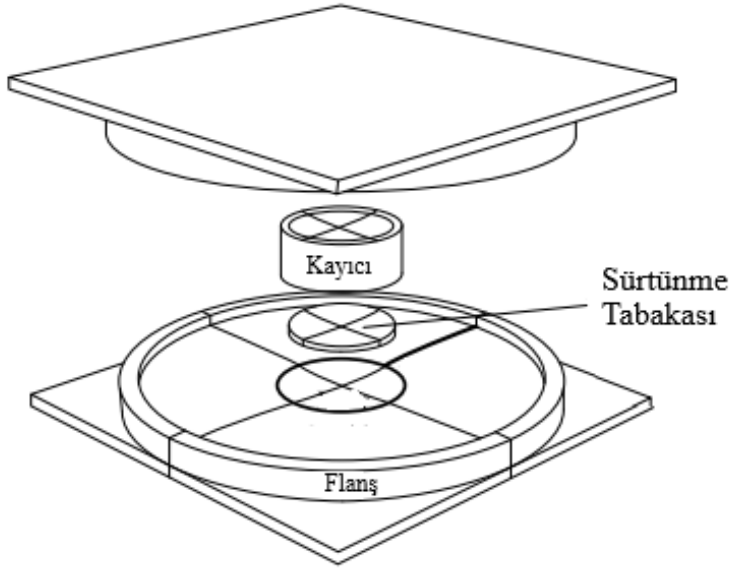
Çift sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerinin özelliklerini doğrulamak üzere Fenz ve Constantinou (2008c) çok fazla sayıda çalışma yaparak içi kavisli yüzeyler için farklı farklı özellikler bularak araştırmalarını teyit etmiş ve çift sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin daha fazla gelişebilmesi için belirli önerilerde bulunmuşlardır. Böylece kullanılması gereken hangi tip izolatör modelinin hangi amaçla kullanılacağı yönünde söylemlerde bulunmuşlardır. (Fenz & Constantinou, 2008c). Başka bir çalışmada ise Malekzadeh ve Taghikhani (2010) tek yüzeyli sarkaç izolatör ile çift sürtünme yüzeyli izolatörün davranışlarını karşılaştırmak için bir deney yapmıştır. Bu deney sonucunda çift sürtünme yüzeyli izolatörün diğerine oranla yapının kuvvetler altındaki davranışını önemli bir şekilde iyileştirdiğinin sonucuna varmıştır (Malekzadeh & Taghikhani, 2010). Şekil 2.7 çift eğrilik yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin yapısını göstermektedir. Bu izolatörlerin en büyük avantajlarından biri yaklaşık olarak tek sürtünmeli yüzeye sahip izolatörler ile aynı geometriye sahip olmasına karşın daha fazla deplasman kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu nedenle taban deplasman taleplerinin daha fazla olduğu durumlarda tercih edilmektedir.



Şekil 2.7. Çift sürtünme yüzeyli sismik izolatörün durgun ve hareketli hâli (Kaynak: Fenz & Constantinou, 2006)

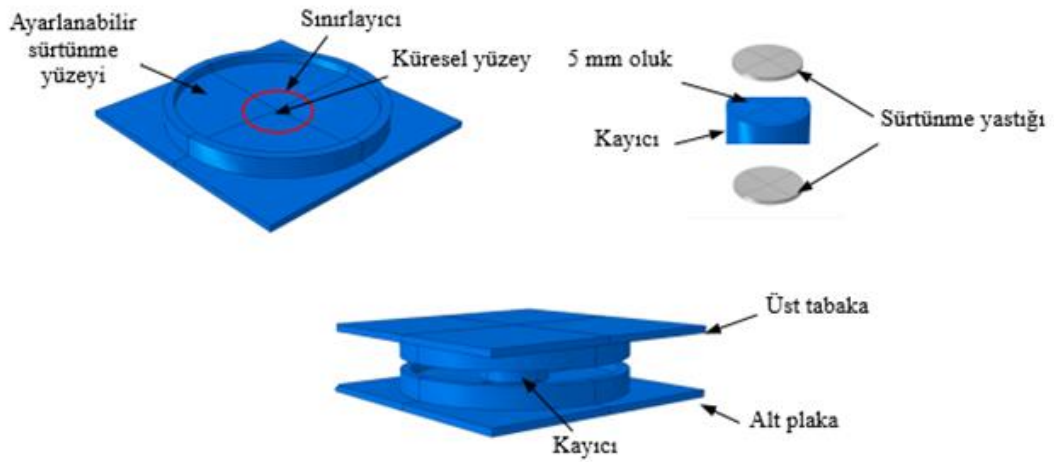
Bu sistemlerde çift sayıda birbirine bakan tabakalar bulunmaktadır. Bu yüzeylerin sürtünme kuvveti katsayıları hem eşit hem de farklı olabilmektedir. Aynı olması durumunda izolatörün çalışma prensibi tek sürtünme yüzeyli izolatöre benzer bir şekilde çalışma göstermektedir. Aksi durumda yani yüzeylerin sürtünme kuvveti katsayıları farklı olması durumunda izolatörün kuvvet yer değiştirme grafiğinde bazı farklılıklar meydana gelmektedir. Bu farklılık sadece sürtünme kuvveti katsayısı ile değil kayıcı yüzeylerin eğrilik yarıçapına, kayıcı yüzeylerin tabaka yüksekliğine ve ortadaki kayıcı elemanın boyuna bağlı olarak farklı tepkiler ortaya çıkabilir.

Şekil 2.7’de çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör gösterilmektedir. İki eğri yüzeyden oluşan sistem herhangi bir dış kuvvetin etkisinden doğacak olan deplasmanlara karşı koymaktadırlar. Bu sistemlerin kullanıldığı yapılar ankastre mesnetlere göre yapının güvenliği açısından oldukça öneme sahiptir.



Şekil 2.8. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör (Kaynak: Cao vd., 2024)

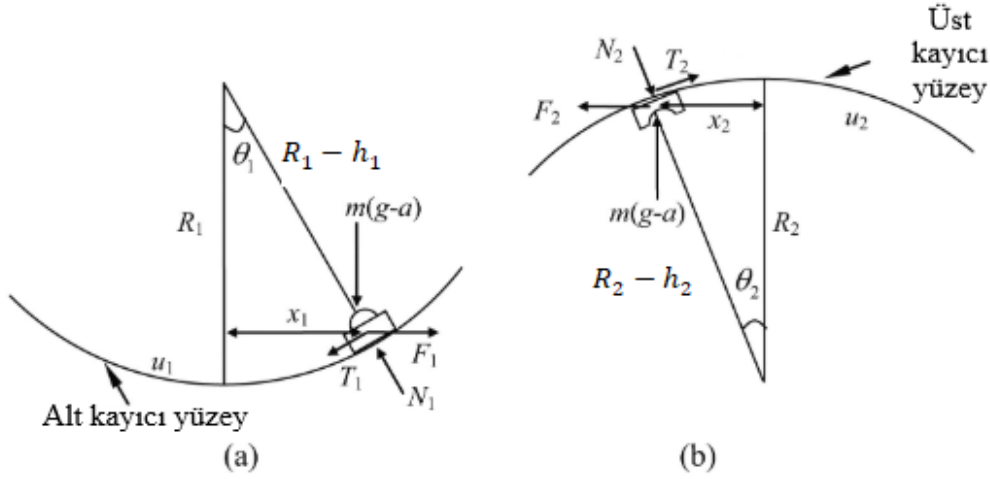
Şekil 2.8’de çift sürtünme yüzeyli tabakalar kuvvet etmesi durumunda sürtünme kuvvetlerinin aşıldığı durumlarda harekete geçmektedir. Yapının kuvvet altında izolatör sisteminin daha fazla (uç derecede) hareketini engellemek amacıyla alt ve üst plakalarda sınırlayıcılar bulunmaktadır. Şekil 2.9’da iki sürtünme yüzeyli izolatörlerin parçaları ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.



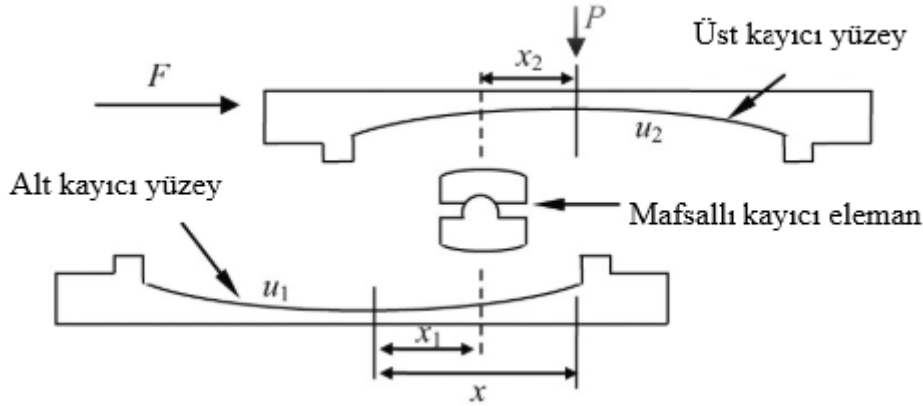
Şekil 2.9. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün elemanları (Kaynak:Zhang vd., 2023)

Sistemde bulunan sürtünme yüzeyli elemanların sürtünme katsayısı üretim aşamasında ayarlanabilmektedir. Yapıya etki eden kuvvet neticesinde izolatör sisteminin hareket etmesi plakaların iç kısmının sürtünme katsayısına bağlıdır. Bu katsayı iki tabaka için aynı veya

farklı olabilir. Bu plakalar ise hareket sebebiyle meydana gelen sürtünme kuvvetini ve sisteme etki eden basınçlara karşı dayanıklı olabilmesi için yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (UHM-WPE) maddesinden üretilmiştir (Cao vd., 2024). Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de hareket durumundaki iki yüzeyli sismik izolatörün şekli ve gelen kuvvetlerin doğrultuları verilmektedir.



Şekil 2.10. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin çalışma mekanizması (Kaynak: Zhou vd., 2019)



Şekil 2.11. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin kuvvet etkisindeki görünümü (Kaynak: Zhou vd., 2019)

$$F_1 - N_1 \sin \theta_1 - T_1 \cos \theta_1 = 0$$

$$m(g - a) - N_1 \cos \theta_1 + T_1 \sin \theta_1 = 0$$

Denklem 2.11. İzolatörün alt yüzeyine etki eden yatay ve dikey yüklerin elde edilmesi

$$F_2 - N_2 \sin \theta_2 - T_2 \cos \theta_2 = 0$$

$$m(g - a) - N_2 \cos \theta_2 + T_2 \sin \theta_2 = 0$$

Denklem 2.12. İzolatörün üst yüzeyine etki eden yatay ve dikey yüklerin elde edilmesi

$$x_1 = (R_1 - h_1) \sin \theta_1$$

Denklem 2.13. İzolatördeki kayıcının alt kısmındaki flanş üzerindeki yer değiştirmesi

$$x_2 = (R_2 - h_2) \sin \theta_2$$

Denklem 2.14. İzolatördeki kayıcının üst kısmındaki flanşın üzerindeki yer değiştirmesi

Denklem 2.11. ile 2.13.'ün birleştirilmesi ile elde edilen denklem;

$$F_1 = \frac{m(g - a)}{(R_1 - h_1) \cos \theta_1} x_1 + \frac{T_1}{\cos \theta_1}$$

Denklem 2.15. İzolatörün alt kısmına etkiyen yatay kuvvet

Aynı şekilde Denklem 2.12 ile 2.14'ün birleşmesi ile elde edilen denklem;

$$F_2 = \frac{m(g - a)}{(R_2 - h_2) \cos \theta_2} x_2 + \frac{T_2}{\cos \theta_2}$$

Denklem 2.16. İzolatörün üst kısmına etkiyen yatay kuvvet

Herhangi bir kuvvet altında, bu kuvvetin sürtünme kuvvetini yendiğinden dolayı izolatör hareket ettiğinde; izolatördeki kayıcının geldiği nokta ile alt ve üst kısmındaki eğri yüzeyli ve geniş olarak üretilen plakaların arasındaki açılar (θ_1 ve θ_2) çok küçük olduğu için bu açıların değeri aşağıda verildiği gibi alınabilir (Constantinou vd., 2007; Zhou vd., 2019).

$$\cos \theta_1 \cong \cos \theta_2 \cong 1$$

$$\sin \theta_1 \cong \sin \theta_2 \cong 0$$

Denklem 2.17. Hareket eden izolatörün eğri yüzeyleri ile yatay yöndeki yer değiştirmesi arasında kalan açılar

Denklem 2.17, Denklem 2.15'deki ilgili kısımlara yazılırsa elde edilen denklem;

$$F_1 = \frac{m(g - a)}{(R_1 - h_1)} x_1 + T_1$$

Denklem 2.18. İzolatörün alt kısmına etkiyen yatay kuvvet

Denklem 2.17, Denklem 2.16'daki ilgili kısımlara yazılırsa elde edilen denklem;

$$F_2 = \frac{m(g - a)}{(R_2 - h_2)} x_2 + T_2$$

Denklem 2.19. İzolatörün üst kısmına etkiyen yatay kuvvet

İzolatörün hareket halindeki herhangi bir noktadaki toplam yer değiştirmesi u olmaktadır.

$$u = x_1 + x_2$$

Denklem 2.20. İzolatörün toplam yer değıştirmesi

Ayrıca izolatörün hem alt kısmına hem de üst kısmına etkiyen kuvvet; bileşke kuvvet ile eşit olmaktadır.

$$F = F_1 = F_2$$

Denklem 2.21. İzolatöre etki eden kuvvetler

Denklem 2.18.'deki yer değıştirme yalnız bırakılırsa;

$$x_1 = \left(\frac{F - T_1}{m(g - a)} \right) (R_1 - h_1)$$

Denklem 2.22. İzolatörün alt plakasındaki yer değıştirmesi

Aynı şekilde Denklem 2.19'daki yer değıştirme yalnız bırakılırsa;

$$x_2 = \left(\frac{F - T_2}{m(g - a)} \right) (R_2 - h_2)$$

Denklem 2.23. İzolatörün üst plakasındaki yer değıştirmesi

$$F = \left(\frac{m(g - a)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right) u + \left(\frac{T_1(R_1 - h_1) + T_2(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right)$$

Denklem 2.24. Yer değıştirmelerin toplanması ile edilen izolatöre ait kuvvet

Yukarıda belirtilen Denklem 2.24 izolatörün kuvvet etkisi altında eş zamanlı hareket ettiğinde, izolatöre etki eden kuvveti bulmak için geliştirilen bir formüldür. Ancak bazen sürtünme kuvveti katsayıları yüzeyler arasında farklılık gösterebilmektedir. Bu durumda sürtünme katsayısı (μ) hangi yüzeyde az ise ilk harekete geçen o olacaktır. Örneğin alt yüzeydeki sürtünme katsayısı üst yüzeydeki sürtünme katsayısından az olsun ($\mu_1 < \mu_2$); bu durumda ilk alt yüzey harekete geçecektir ($x_1 = u, x_2 = 0$). Ancak yapıya etkiyen dış kuvvet üst yüzeydeki sürtünme kuvvetini yendiğinde ($F = T_2$) iki yüzey birlikte hareket edecektir. Her iki yüzeyinde hareket etmesi durumdaki yer değıştirme u^* ;

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)(R_1 - h_1)$$

Denklem 2.25. İzolatördeki her iki yüzeyin hareket etmesi sonucu meydana gelen yer değıştirme

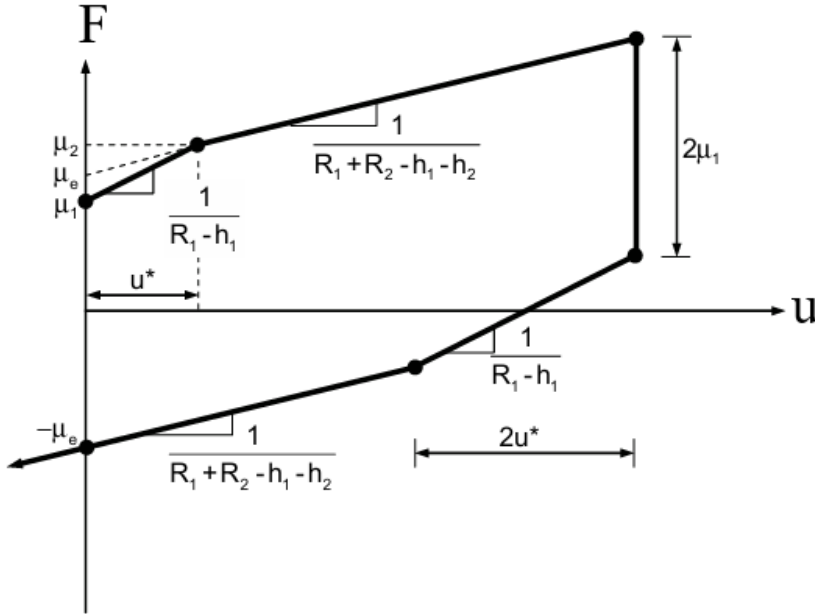
$$\mu_1 = \frac{T_1}{W}$$

Denklem 2.26. İzolatörün alt kısmındaki sürtünme katsayısı

$$\mu_2 = \frac{T_2}{W}$$

Denklem 2.27. İzolatörün üst kısmındaki sürtünme katsayısı

Elde edilen Denklem 2.26 ve Denklem 2.27'deki ifadeler sürtünme katsayılarının birbirinden farklı olması durumunda elde edilen formüllerdir. Bu sebeptir ki Denklem 2.24 sadece kuvvet etkisi altındaki izolatörün alt tabakasındaki yer değiştirmenin ve üst yüzeydeki yer değiştirmenin toplamının; her iki yüzey hareket ettiğinde meydana gelen yer değiştirmeden büyük olduğu durumlarda gerçekleşmektedir ($u > u^*$). Diğer bir durum ise her iki yüzeyin hareketi sonucu oluşan yer değiştirmenin (u^*), yüzeylerin farklı zamanlarda yani sürtünme katsayılarının farklı olduğu durumlarda meydana gelen yer değiştirmeden ($x_1 + x_2 = u$) büyük olmasıdır. Bu durumlarda eğer alt yüzeydeki sürtünme katsayısı üst yüzeydeki sürtünme kuvveti katsayısından büyük olursa ($\mu_1 > \mu_2$) Denklem 2.19; eğer tersi olursa ($\mu_1 < \mu_2$) Denklem 2.18 geçerlidir (Constantinou vd., 2007; Zhou vd., 2019).



Şekil 2.12. $\mu_1 < \mu_2$ Olması durumundaki çift sürtünme yüzeyli izolatörün kuvvet-yer değiştirme grafiği (Kaynak: Constantinou vd., 2007)

Belirli bir kuvvet altındaki izolatörün karakteristik dayanımı; $\mu_e W$ dir. Buradaki μ_e efektif sürtünme kuvveti katsayısıdır. Denklem 2.24'teki ifade W ye bölünürse yani μ_e yalnız bırakılırsa elde edilen ifade Denklem 2.28'de verilmektedir.

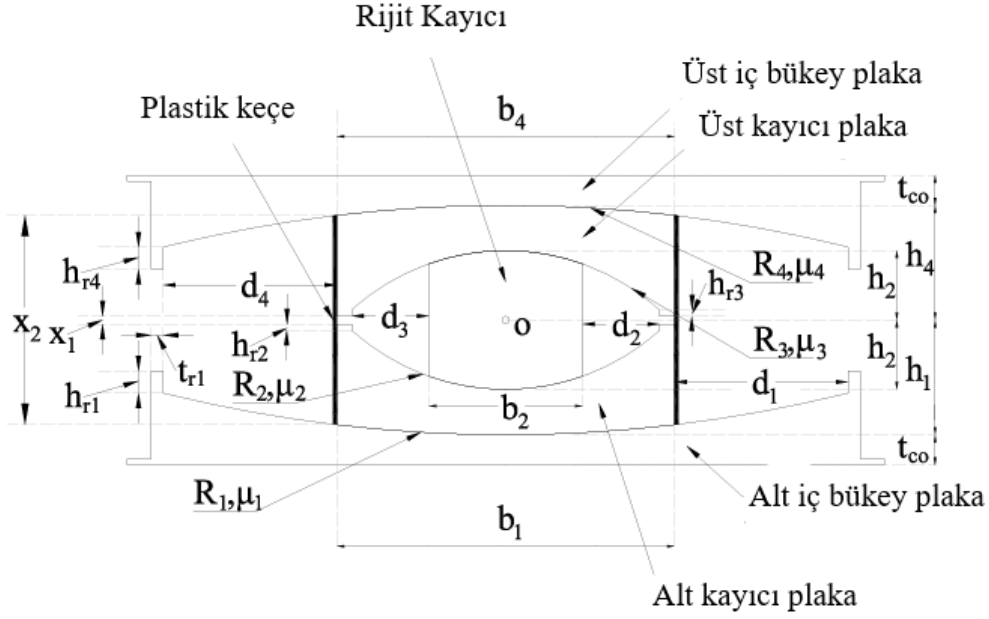
$$\mu_e = \left(\frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right)$$

Denklem 2.28. Efektif sürtünme katsayısı

2.3.Üç Sürtünme Yüzeyli Sarkaç Tipli Sönümleyiciler

Sürtünmeli izolatör sistemlerinde artan kayma düzlemi sayısı gelen deprem taleplerine karşı artan deplasman kapasitesi sağlamaktadır. İzolatörün yapısında bulunan kayıcı eleman ve kayıcı yüzeylerin ayarlanabilir geometrik yapısı, sürtünme kuvveti ve dayanımları sayesinde değişken deprem etkileri altında farklı yapılarda kullanımına olanak sağlamaktadır (Xu vd., 2025). Morgan ve Mahin, (2008), üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörler ile kauçuk tipli izolatörleri kıyaslamıştır. Kauçuk tipli sönümleyiciler zamanla ve hareket ettikçe kauçuk malzemesinde meydana gelen yıpranma ve yorulma durumları ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada bu sorunlardan dolayı ve üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörlerin bazı avantajlarından dolayı sürtünmeli sönümleyicilerin öne çıktığı görülmektedir (Morgan & Mahin, 2008). Bir diğer yandan üç sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin deplasman kapasiteleri tek sürtünmeli sistemler için de sağlanmaya çalışılır ise bu durumda tek sürtünmeli sistemin çok daha fazla alana ihtiyacı olmaktadır. Bu nedenle sistemlerin kapasite artırımı yapmak için geometrik olarak değişiklik yapılması gerekmektedir (Xu vd., 2025).

Artan deprem büyüklüklerinin yapılarda oluşturduğu yer değiştirme fazlalığından dolayı ihtiyaç duyulan rijitlik ve mukavemet gerekliliği ve ayrıca bu özelliklerin istenilen şekilde ayarlanabilir olması üç sürtünme yüzeyli sismik izolatörlerin gelişimine olanak sağlamıştır (Sarlis & Constantinou, 2016). Bu sistemlerin ilk olarak kullanılması ve bulunması Fenz ve Constantinou (2008a, 2008b, 2008c) yaptığı çalışmalar ve Morgan (2007) tarafından yapılan çalışmalar sayesinde ortaya çıkmıştır. Bu araştırmacıların tasarlamış olduğu üç sürtünme yüzeyli sistem Şekil 2.14'te verilmiştir (Fenz, 2008; Fenz & Constantinou, 2008a, 2008b, 2008c; Morgan, 2007).



Şekil 2.13. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör (Kaynak: Sarlis & Constantinou, 2013)

Şekil 2.14'teki d_1, d_2, d_3, d_4 yer değiştirme kapasiteleri, R_1, R_2, R_3, R_4 plakların eğrilik yarıçapları, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ değerleri plakaların sürtünme katsayıları, h_1, h_2, h_3, h_4 değerleri plaka yüksekliklerini, b_1, b_2, b_3, b_4 plakaların genişliklerini ifade etmektedir. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün farklı durumlardaki hareketlerinin denklemleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün plaka durumlarına göre kuvvet-yer değiştirme parametreleri

İzolatörün Durumu	Kuvvet-Yer Değiştirme
Sadece 2 ve 3 numaralı yüzeyin hareket etmesi	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$ $F = F_{f1} = \mu_1 W, u = u' = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3}$
Sadece 1 ve 3 numaralı yüzeyin hareket etmesi, 2 numaralı yüzeyin durması	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ $F = F_{f4} = \mu_4 W, u = \ddot{u} = u' = (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$

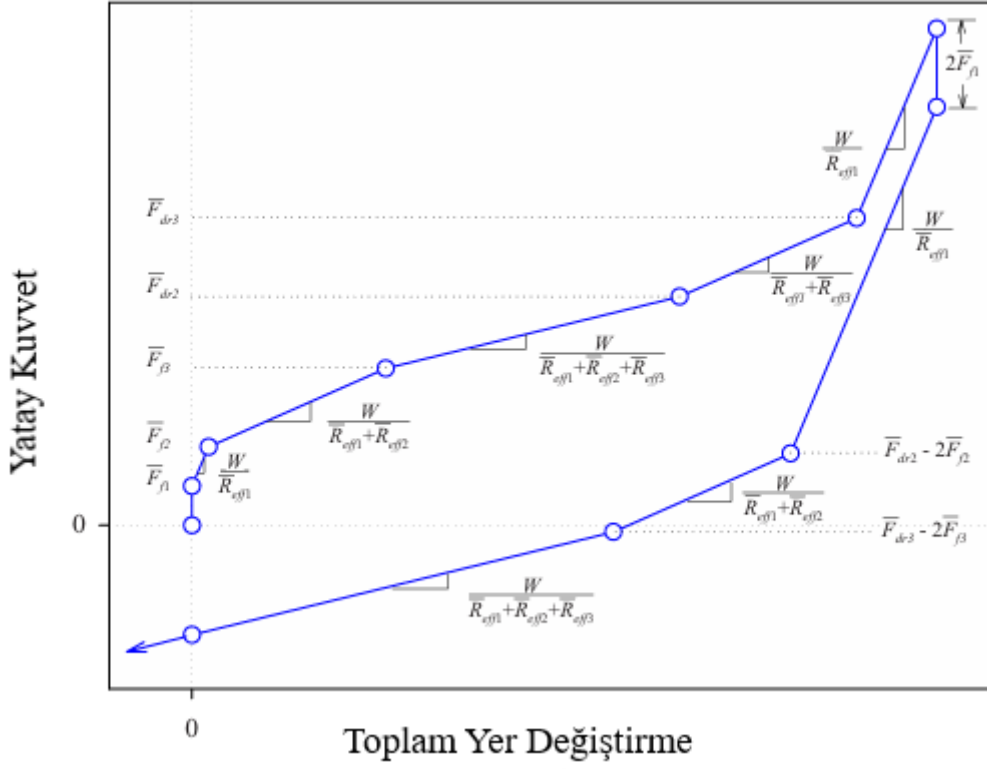
Tablo 2.1. (devamı) Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün plaka durumlarına göre kuvvet-yer değiştirme parametreleri

2 ve 3 numaralı yüzeylerin durup 1 ve 4 numaralı yüzeylerin hareket etmesi	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ $F = F_{f1} = \mu_1 W, u = u' = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3}$
1 numaralı yüzeyde sınıra kadar gelip, 3 numaralı yüzeyin durması, 2 ve 4 numaralı yüzeylerin hareket etmesi	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$ $F = F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}, u_{dr4} = u_{dr1} + \left(\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right) (R_{eff2} + R_{eff4})$
1 ve 4 numaralı plakların sınırlayıcılara kadar gelip, 2 ve 3 numaralı plakların hareket etmesi	$F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}, u = u_{dr1} = \ddot{u} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$

(Kaynak: Fenz & Constantinou, 2008b)

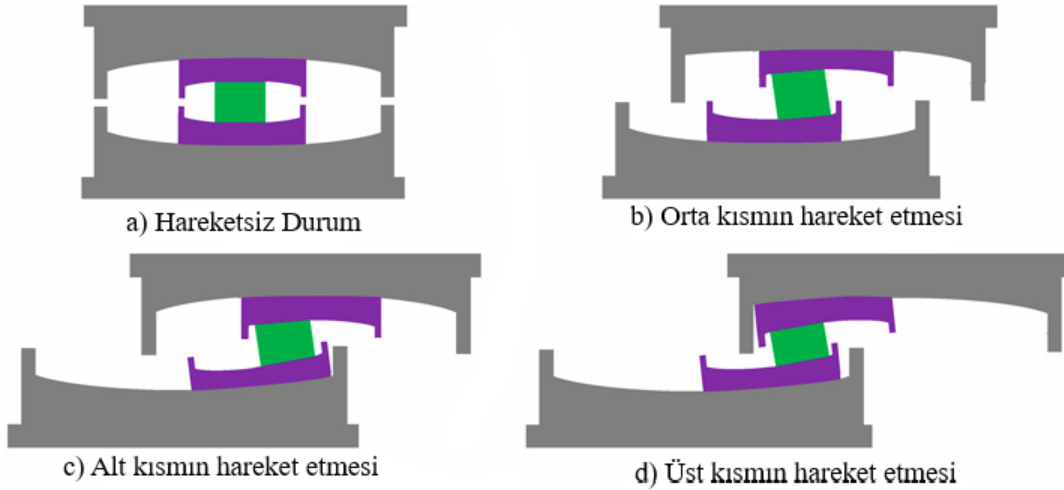
Tablo 2.1'e ait bazı varsayımlar;

- 1) $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$
- 2) $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$
- 3) $d_1 > (\mu_1 - \mu_4)R_{eff1}$
- 4) $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$
- 5) $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$



Şekil 2.14. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün yatay kuvvet altındaki deformasyon grafiği (Kaynak: (Fenz & Constantinou, 2008b))

Şekil 2.14 üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerin kuvvet etkisindeki histerezis grafiği verilmektedir. Şekil 2.15’te üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün durgun ve hareketli durumlarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.15. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatörün farklı durumlardaki konumu (Kaynak: Xu vd., 2025)

2.4. Problem durumu / Konunun tanımı

Doğada kendiliğinden oluşan olaylar insan hayatını doğrudan etkileyen ve kayıplara yol

açabilecek nitelikte olabilmektedir. Bunlar büyüklükleri ve etkileri baz alınarak doğal afet olarak adlandırılmaktadır. Bu doğal afetler insan hayatı için tehlikeli olduğu için bunlara karşı önlem alınması gerekmektedir. İnsanların yaşamını sürdürdüğü binalarda doğal afetlerin oluşturduğu veya oluşturacağı etkileri azaltmak İnşaat Mühendisliği biliminin en önemli uğraş alanlarından birisidir. Bu amaçla farklı sistemler geliştirilmiştir ve farklı yapılarda kullanılmaktadır. Bu tür elemanların bulunduğu yapıların tasarımı yapılırken depremde göstereceği davranış tahmin edilerek bir tasarım yapılmalıdır. Klasik olarak yapılan tasarımlarda bir tek deprem etkisi dikkate alınarak yapı talebi belirlenmekte ve tasarım buna bağlı olarak yapılmaktadır.

Ancak bir yapının maruz kalacağı deprem sayısı birden fazla olabilmektedir. Özellikle magnitüd değeri çok büyük olan depremleri yine çok büyük enerjiye sahip artçı şoklar izleyebilmektedir. Bu nedenle, tek bir depreme karşı değil yapının hayatı boyunca depreme karşı korunması gerekmektedir. Dolayısıyla bir tek deprem etkisi altında değil, binanın ana şok depremini atlattıktan sonra maruz kalacağı artçı şok depremleri de dikkate alınarak yapılan tasarım sahada gözlemlenecek olan gerçek davranışa yakın olarak talep değerlerini belirlenmesini sağlayacaktır. Özellikle sürtünmeli sarkaç sisteminin kullanıldığı sismik izolatörlü yapılarda meydana gelecek olan tepkiler hem izolatör boyutlarının belirlenmesi, üst yapı elemanlarının boyutlandırılması ve ayrıca komşu yapılar arasında bırakılacak mesafeler açısından son derece önemlidir. Bir ana şok depremi sonrasında meydana gelebilecek olan kalıcı izolatör deplasmanı bir sonraki deprem olan artçı şok için başlangıç koşulunu oluşturacak ve buna bağlı olarak elde edilecek tepkiyi değiştirebilecektir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ana şok ve artçı şok depremlerinin etkisi altında bulunan sürtünmeli sarkaç izolatörlü yapıların davranışının nasıl değiştiği araştırılacaktır.

2.5. Artçı Şok ve Ana Şok

Artçı şoklar ana şoktan sonra meydana gelen genellikle daha az büyüklüğe sahip depremlerdir ve belirli süre aralıklarında devam ederler. Artçı şoklar ile ana şokların çeşitli sayıda merkez üssü bulunabilmektedir. (Zhang vd., 2019). Ana şok ile ardından daha düşük büyüklükte etki eden artçı şoklar günlerce hatta aylarca sürebilmektedir. Bu depremler arasındaki zaman daha fazla olursa ana şoktan etkilenen ve hasar alan yapılar onarılarak artçı şokun etkisi daha da azaltılabilir. Geçmiş dönemde meydana gelmiş deprem kayıtları incelendiği zaman ana şoktan sonra oluşan artçı şokların yapılara olan etkisinin fazla olduğu aynı zamanda insan hayatı bakımından da bazı problemler oluşturduğu söylenebilir. Buna

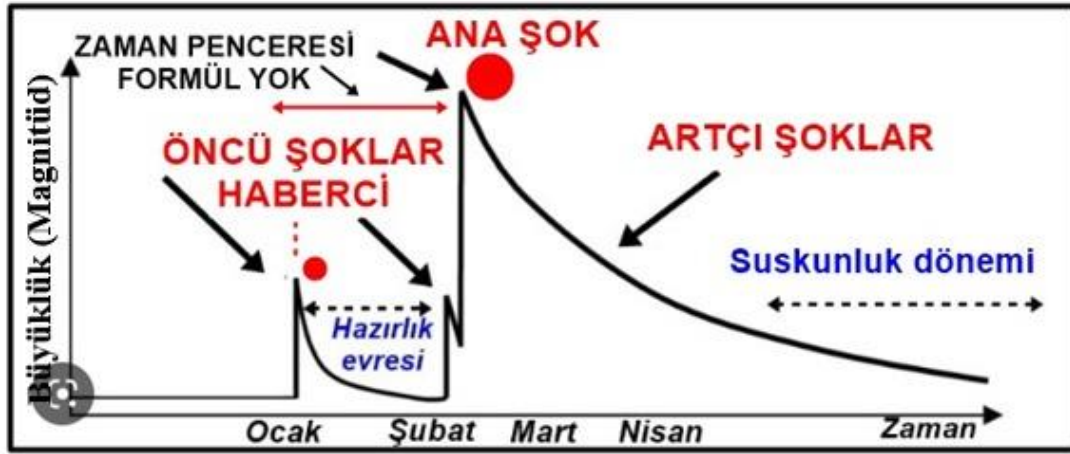
örnek olarak 2011 yılına Yeni Zelanda’da meydana gelen Christchurch depremi ülkeyi hem yapısal anlamda hem de ekonomik anlamda güç kaybına uğratarak ülke açısından önemli bir deprem olarak tarihte yerini almaktadır (Boore vd., 2014; Douglas & Halldórsson, 2010). Geçmişteki olaylara bakıldığında zaman ana şok tarafından belirli bir hasara uğramış olan yapıların ana şoktan sonra etki eden artçı şokların dayanma gücü kalmamış yapılara olan etkisi oldukça fazladır. Bu sebepten dolayı ana şok ve artçı şokların etki etme büyüklükleri belirli çalışmalardan yola çıkarak aralarındaki matematiksel denklemler elde edilerek tahmin edilmesi gerekmektedir (Zhang vd., 2019).

Shcherbakov vd., (2005)’e göre en büyük depremin büyüklük derecesini tahmin etmek için kullanılan Baht Yasası’na göre artçı şok ve ana şok arasındaki büyüklük oranlarının neredeyse birbirinin aynısı olduğunu ve artçı şokun ana şoktan bağımsız büyüklükte olduğunu vurgulamıştır. Bu yasanın bir değişik versiyonu olan ve Gutenberg-Richter yasası ile birleştirilerek ortaya çıkan bir yasa, artçı şokların frekans-büyüklük değerlerini bulmak için kullanılmıştır (Shcherbakov vd., 2005). Li, Ellingwood (2007) ve Shcherbakov, Turcotte (2004) ise değiştirilmiş Gutenberg-Richter yasasını kullanarak artçı şokların etki büyüklüklerini hesaplamak için bir olasılık denklemi oluşturmuşlardır. Ayrıca meydana gelen en büyük şiddetli artçı şok deprem etkilerinin dağılımlarını belirlemek için Monte Carlo yöntemini de kullanmışlardır (Li & Ellingwood, 2007; Shcherbakov & Turcotte, 2004).

Ruiz-García, (2012), yaptığı çalışmada birçok deprem kayıtlarını ele almış ve bunların yapıların üzerindeki etkilerini araştırmıştır. (Boore vd., 2014; Douglas & Halldórsson, 2010; Ruiz-García, 2012). 1985 yılında meydana gelmiş olan ve büyüklüğü 8.0 olan Michoacan depremini de incelendiğinde depremin artçı şoktaki değişen periyotlardaki zemin hareketlerinin yapılar üzerindeki etkisinin bir hayli fazla olduğunu göstermiştir. Hatzigeorgiou ve Liolios, (2010) ise ABD’de meydana gelen depremleri ve bu depremlerin güçlendirilmiş beton ile yapılmış olan yapıların üzerindeki etkilerini incelemiştir. İncelemede artçı şokların elde edilmesinin zor olduğunu ve eğer artçı şok ile ilgili daha fazla bilgi sahibi olunması isteniyorsa artçı şok için yapılan ölçümlerin önemli olduğunu vurgulamıştır. Artçı şokların büyüklüğünün bilinmesi durumunda hem ana şok hem de artçı şoktan etkilenen yapılar için alınması gereken önlemlerin veya bu yapıların ileriye dönük maruz kalacağı deprem risklerinden nasıl korunması gerektiğinin önemini vurgulanmıştır. Fakat artçı şok ile ilgili yapılan çalışmaların daha doğrusu ana şok ve artçı şok ikilisinin birlikte kullanıldığı sayısal yöntem çalışmalarının azlığı göze çarpmaktadır (Hatzigeorgiou & Liolios, 2010). Goda ve Taylor (2012) yaptığı çalışmada gerçekleşen depremin süresinin

uzun olması durumunda artçı şokun sahip olduğu spektral ivme değerinin ana şokun sahip olduğu spektral ivme değerinden çok daha küçük olduğunu kanıtlamıştır. Fakat bu ivmelerin değil de büyüklükleri düşünülmesi durumunda eğer büyüklük değerlerinin birbirine yakın olması hâlinde her iki depremin de zeminde meydana getirdiği hareketlerin farklarına bakılması durumunda hesabın doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir (Goda & Taylor, 2012). Atkinson (1993) Amerika'nın kuzeydoğusundaki bölgesel deprem kayıtlarını incelediğinde oluşan ana şok depremlerinin çoğunun büyüklükleri eşit olması durumunda ardından gerçekleşen artçı şokların oluşturduğu spektral ivme değerleri çok daha küçük çıkmaktadır (Atkinson, 1993). Diğer bir yandan Douglas ve Halldórsson, (2010) Orta Doğu, Akdeniz ve Avrupa bölgelerinde yaptığı incelemeler sonucunda artçı şokların ve ana şokların oluşturduğu zemin hareket değerlerinin kayda alınmayacak kadar yetersiz olduğunu söylemiştir (Douglas & Halldórsson, 2010).

Şekil 2.16'da artçı şok ve ana şokun zamana bağlı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Ana şok ve artçı şok depremlerinin grafiksel görünümü (Kaynak: <https://x.com/Paleosismolog/status/1633780757314301953/photo/1>)

Zahid vd., (2012) yaptığı çalışmada sadece ana şokun etkilediği yüksek katlı betonarme yapıların ana şoka olan tepkisi ile ana şoktan sonra meydana gelen yakın faydaki artçı şokların yüksek katlı betonarme yapılara olan etkisi arasındaki farkın önemli olduğunu belirtmişlerdir (Zahid vd., 2012). Luco vd., (2004) ise yapıların hem artçı şoka hem de ana şoka maruz kaldığı durumlar için statik ve dinamik analizler yapmışlardır. Bu yapılan analizlerde yapıların depremlerden sonra güç tükenmesi durumunu incelemişlerdir (Luco vd., 2004). Ana şokun hemen ardından oluşan üç adet artçı şokun yapıların davranışını olumsuz yönde etkileyip yıkılmasına sebep olduğu durumlar da literatürde bulunmaktadır

(Ghabili vd., 2012). Bu şekilde verilen örneklerden yola çıkarak ana şokun ve artçı şokun kısa sürede etki ettiği yapıların dayanma kapasitesini düşürdüğünü söylenebilir. Bu nedenle yapılar tasarlanırken hem ana şok hem de artçı şoka karşı dayanacak şekilde tasarlanmalıdır (Srinath & Gopikrishna, 2024).



3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu çalışmada iki yüzeyli ve üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemleri kullanılarak izole edilmiş yapıların tekrarlı depremler altındaki davranışı araştırılmıştır. Farklı izolatör ve üst yapı parametrelerine bağlı olarak meydana gelen farklı yapısal tepkiler analiz edilmiştir. Bu bağlamda zaman tanım alanında analizler yapılarak tepkilerin zaman içerisinde ne şekilde değiştiği gözlemlenerek çıkarımlar yapılmıştır. Nümerik simülasyonlar için açık kaynak kodlu deprem simülasyon programı olan OpenSees (McKenna, 1997) programının Python kütüphanesi olan OpenSeesPy kullanılmıştır (Zhu vd., 2018). Bu program farklı deprem analizleri ve simülasyonları için birçok araştırmada kullanılmış ve geçerliliği kabul edilen bir programdır. Farklı yapısal elemanların veya birleşim bölgelerinin modellenmeleri için bu program kütüphanesinde bulunan *ModIMKPeakOriented* gibi malzeme modelleri ile çok geniş yelpazede yapıların davranışı temsil edilebilmektedir (Ibarra vd., 2005; Lignos, 2008; Lignos & Krawinkler, 2011, 2013; Lignos vd., 2011).

Yapılacak olan simülasyonlarda yapı modeli tek serbestlik dereceli olarak modellenecek ve üst yapının altında ise sürtünmeli sarkaç tipli izolatör bulunacaktır. Üst yapının tek serbestlik dereceli olarak modellenerek alt yapıda izolatörlerin kullanılması literatürde yer alan bir yöntemdir. Özellikle izolatörlü yapılarda birinci titreşim modunda üst yapıda meydana gelen göreceli deformasyonlar ne oranda az olur ise bu yöntemin barındırmış olduğu hata da o derecede az olmaktadır. Warn ve Ryan (2012) bu tür yapı modellemesinin ne derecede hata barındırdığını araştırmıştır. Üst yapının 3 boyutlu modellenmesi ile birlikte tek serbestlik dereceli olarak modellenerek elde edilen deprem tepkileri karşılaştırılmıştır. Üst yapının vermiş olduğu tepkiler arasındaki fark her iki modelleme yaklaşımı için de ihmal edilebilir düzeydedir (Warn & Ryan, 2012). Ayrıca Yenidoğan (2024) tek serbestlik dereceli olarak modellenen üst yapının tepkisini sarsma tablası deneyleri ile araştırmıştır (Yenidoğan, 2024). Bu çalışma da göstermektedir ki yapılacak olan analizler yapılarda meydana gelecek olan tepkiler hakkında gerçek değere çok yakın olarak bir çıktı verecektir.

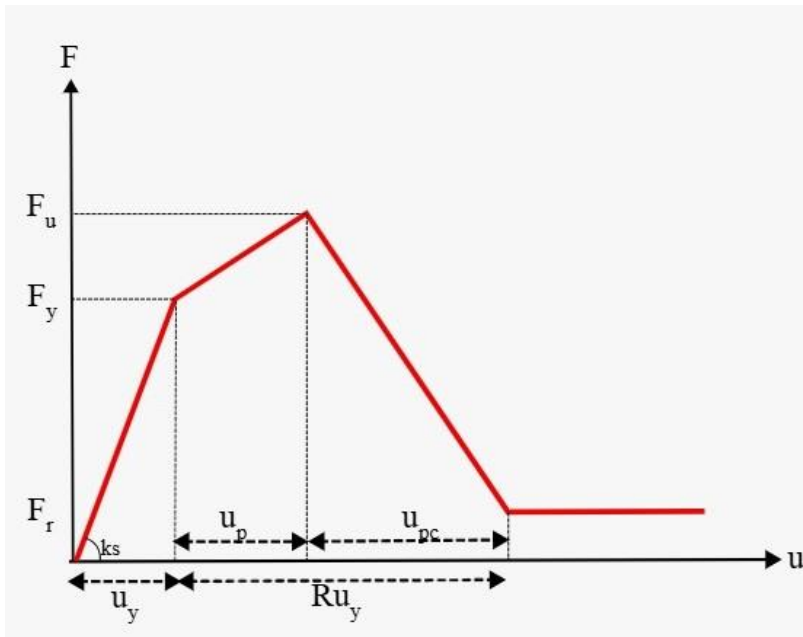
Ancak yapılacak olan değerlendirmede elde edilecek olan çıktıların adedi ve dağılımı son derece önemlidir. Bu nedenle girdi parametrelerinin rastgele oluşturulması planlanmıştır. Böylece elde edilecek olan parametre kombinasyonlarının olabildiğince farklı durumları göz önüne alacak şekilde sonuç vermesi amaçlanmıştır.

Bu bağlamda üst yapıya ve izolatörlere bağlı olarak elli bin adet farklı kombinasyon değerleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca deprem parametrelerine bağlı olarak da depremin

yapıya olan etkisinde önemli rol oynayan parametreler de seçilerek yapılacak olan zaman tanım alanındaki analizlerde bu deprem parametreleri kullanılmıştır.

3.1. Üst yapıya ait parametreler

Bir yapının deprem etkisi altında göstereceği tepkinin ve ne şekilde olacağının en önemli ölçüleri olarak görülen bazı yapısal parametreler seçilmiştir. Bunlar üst yapının rijitliği, kütlesi ve akma dayanımı gibi parametrelerdir. Üst yapı tek serbestlik dereceli olarak modellendiğinden ve yük altında yapının meydana getireceği yük deplasman ilişkisi bir adet link elemanı kullanılarak tanımlanacaktır. Yapılar artan yükler altında genellikle ilk olarak lineer elastik davranış gösterirler ancak artan yük değerine bağlı olarak maksimum taşıyabileceği yük değerine ulaştıktan sonra ise artan deformasyon etkisi altında direnebileceği yük değerinde azalma meydana gelir. Güç tükenmesi durumunda ise yapılar artan deformasyonlar altında ya çok az bir yük değerine karşı direnç gösterir ya da direncini tamamen de kaybedebilir. Bu durum aşağıda verilen Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



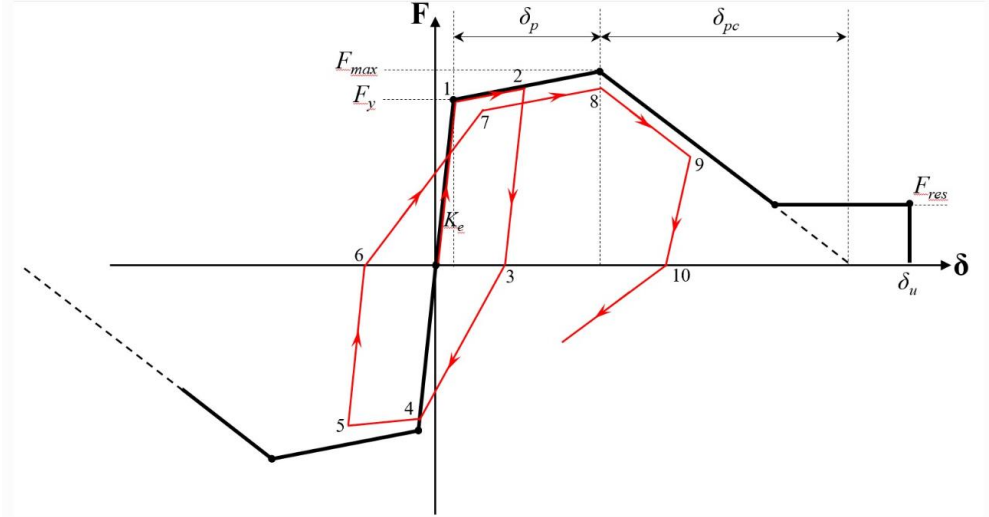
Şekil 3.1. Artan yer değiştirme altında yapıların temsili yük- yer değiştirme ilişkisi

Bu şekilde yer alan F_y değeri yapının akma dayanımı olarak gösterilmektedir. F_u ise direnebileceği maksimum yük, F_r ise güç tükenmesi durumunda direnç göstereceği yük değeridir. Yapının akmadan sonra güç tükenmesi durumuna kadar göstereceği yer değiştirme kapasitesi de Deprem Mühendisliği açısından son derece önemlidir. Bu kısımda (Ru_y) meydana gelecek olan yer değiştirme değerinin akma yer değiştirme değerine (u_y)

oranı “süneklik” olarak ifade edilmektedir. Bu değerin yüksek olması deprem etkisi altında gösterilecek olan enerji yutma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Süneklik değerinin yüksek olması deprem performansı açısından belli bir dereceye kadar olumlu katkı sunar. Ancak bu değerin çok fazla olması durumunda ise artan ikinci mertebe etkilerine bağlı olarak yapıda stabilite problemlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu süneklik değeri verilen Şekil 3.1’de “R” ile gösterilmiştir. Maksimum kuvvet ile akma noktası arasında yer alan yer değiştirme kapasitesi ise “ u_p ” olarak gösterilmiştir. Maksimum kuvvete karşılık gelen yer değiştirmeden sonra güç tükenmesi durumuna kadar olan kısım ise u_{pc} olarak belirtilmiştir. Ancak burada verilen yük deformasyon eğrisi sadece itme etkisi altındaki davranışı göstermektedir. Ancak tekrarlı yükler altında yapıların histeretik bir davranış sergilediği bilinmektedir. Dolayısıyla kullanılacak olan link elemanının da bu histeretik davranışı temsil etmesi gerekmektedir.

Bu yapılan tanımlamalar ve değerlendirmeler sonucunda OpenSees programında kullanılacak olan link elemanına göre parametreler seçilmiştir. Programda yer alan *ModIMKPeakOriented* malzeme modeli belirtilen davranışı sergileyebilen bir modeldir (Ibarra vd., 2005; Lignos, 2008; Lignos & Krawinkler, 2011, 2013; Lignos vd., 2011) ve bu çalışma kapsamında üst yapı modellemesinde kullanılmıştır. Oluşturulan link elemanı düşey doğrultuda rijit, yatay deprem doğrultusunda ise belirtilen malzeme modeli ile oluşturulan malzeme özelliklerine sahip olacaktır ve yük altındaki kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.1’de verilen grafiğe benzer olacaktır. *ModIMKPeakOriented* malzeme modeli hem yapılarda meydana gelen nonlineer etkilerin dikkate alınması amacı ile düğüm noktalarında hem de yapıların kendisinin doğrudan modellenmesinde kullanılmaktadır. Tekrarlı yükler altında histeretik davranışı modelleyerek tahmin etmede de kullanılan bu model birçok araştırmada yer almıştır. Yine tekrar eden yükler altında yapılarda oluşan dayanım ve rijitlik kaybı gibi kayıplar da bu model tarafından yapılacak olan analizlerde dikkate alınabilmektedir. Gerek görülür ise asimetrik davranış da modellenerek oluşacak olan kayıpların itme ve çekme altındaki farklı tepkileri de göz önüne alınabilmektedir. Yapılacak olan modellemelerde kullanıcı tarafından verilen girdi parametrelerine bağlı olarak hesaplanan referans enerji değerlerine ilişkin oluşacak olan dayanım ve rijitlik kayıpları her bir döngüde hesap edilerek kuvvet deformasyon ilişkisine yansıtılmaktadır. Dolayısıyla tekrarlı yükler altında meydana gelen hem dayanım hem de rijitlik kayıpları bu model ile dikkate alınabilmektedir. Malzeme modeli dört adet yapısal tepkinin döngülere bağlı olarak azalım ilişkisini dikkate alabilmektedir. Bunlar, akma dayanımı, maksimum dayanım, itme ve çekme durumlarında meydana gelen rijitliklere bağlı olarak hesaplanan dayanım

kayıplarıdır. Aşağıda verilen Şekil 3.2’de *ModIMKPeakOriented* malzeme modeline ait kuvvet-deplasman (yük-gerilme) ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.2. ModIMKPeakOriented grafik modeli (Kaynak: Ibarra vd., 2005)

Çalışmada kullanılacak olan üst yapı modeline ait kuvvet yer değiştirme grafiğinin modellenmesine bağlı olarak seçilen parametreler ayrıca bu *ModIMKPeakOriented* modelin girdi parametrelerine de uygun olarak seçilmiş veya hesap edilmiştir. OpenSees’de yer alan bu model 24 adet girdi parametresine ihtiyaç duymaktadır. Bu parametreler aşağıda yer alan Tablo 3.1’de açıklamaları ile birlikte verilmiştir ([https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Modified_Ibarra-Medina-Krawinkler_Deterioration_Model_with_Peak-Oriented_Hysteretic_Response_\(ModIMKPeakOriented_Material\)](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Modified_Ibarra-Medina-Krawinkler_Deterioration_Model_with_Peak-Oriented_Hysteretic_Response_(ModIMKPeakOriented_Material)))

Tablo 3.1. ModIMKPeakOriented modeline ait girdi parametreleri ve açıklamaları

Girdi Parametresi	Girdi Parametrelerine ilişkin açıklama
\$matTag	Malzemenin tam sayı numarası
\$K0	Elastik rijitlik
\$as_Plus	Pozitif yükleme yönü için gerilme sertleşme oranı
\$as_Neg	Negatif yükleme yönü için gerilme sertleşme oranı

Tablo 3.1. (devamı) ModIMKPeakOriented modeline ait girdi parametreleri ve açıklamaları

\$My_Plus	Pozitif yükleme yönü için efektif akma kuvveti
\$My_Neg	Negatif yükleme yönü için efektif akma kuvveti (negatif değerli)
\$Lamda_S	Dayanım bozulması için döngüsel bozulma parametresi [$E_t = \text{Lamda_S} * M_y$, see Lignos and Krawinkler (2011); set Lamda_S = 0 bozulmanın bu modunu devre dışı bırakmak için]
\$Lamda_C	Tepe noktası sonrası dayanım bozulması için döngüsel bozulma parametresi [$E_t = \text{Lamda_C} * M_y$, see Lignos and Krawinkler (2011); belirlenen Lamda_C = 0 bozulmanın bu modunu devre dışı bırakmak için]
\$Lamda_A	İvmelendirilmiş geri yükleme rijitlik bozulması için döngüsel bozulma parametresi [$E_t = \text{Lamda_A} * M_y$, see Lignos and Krawinkler (2011); belirlenen Lamda_A = 0 bozulmanın bu modunu devre dışı bırakmak için]
\$Lamda_K	Yükü kaldırılan rijitlik bozulması için döngüsel bozulma parametresi [$E_t = \text{Lamda_K} * M_y$, see Lignos and Krawinkler (2011); belirlenen Lamda_K = 0 bozulmanın bu modunu devre dışı bırakmak için]
\$c_S	Dayanım bozulmasının oranı. Varsayılan değeri=1.0.
\$c_C	Tepe noktası sonrası dayanım bozulmasının oranı. Varsayılan değeri= 1.0.
\$c_A	İvmelendirilmiş geri yükleme bozulmasının oranı. Varsayılan değeri=1.0.
\$c_K	Yükü kaldırılan rijitlik bozulmasının oranı. Varsayılan değeri=1.0.
\$theta_p_Plus	Pozitif yükleme yönü için tepe noktası öncesi dönme (plastik dönme kapasitesi olarak bazen not edilir)
\$theta_p_Neg	Negatif yükleme yönü için öncesi dönme (plastik dönme kapasitesi olarak bazen not edilir) (pozitif bir değer olarak tanımlanmış olması gereklidir)
\$theta_pc_Plus	Pozitif yükleme yönü için tepe noktası sonrası dönme
\$theta_pc_Neg	Negatif yükleme yönü için tepe noktası sonrası dönme (pozitif bir değer olarak tanımlanmış olması gereklidir)

Tablo 3.1. (devamı) ModIMKPeakOriented modeline ait girdi parametreleri ve açıklamaları

\$Res_Pos	Pozitif yükleme yönü için kalıntı dayanım oranı
\$Res_Neg	Negatif yükleme yönü için kalıntı dayanım oranı (pozitif bir değer olarak tanımlanmış olması gereklidir)
\$theta_u_Plus	Pozitif yükleme yönü için nihai dönme kapasitesi
\$theta_u_Neg	Negatif yükleme yönü için nihai dönme kapasitesi (pozitif bir değer olarak tanımlanmış olması gereklidir)
\$D_Plus	Pozitif yükleme yönündeki döngüsel bozulmanın oranı (bu parametre bir kompozit kiriş durumunda asimetrik grafiksel davranışı oluşturmak için kullanılır). Simetrik grafiksel tepki kullanımı için değeri=1.0
\$D_Neg	Negatif yükleme yönündeki döngüsel bozulmanın oranı (bu parametre bir kompozit kiriş durumunda asimetrik grafiksel davranışı oluşturmak için kullanılır). Simetrik grafiksel tepki kullanımı için değeri=1.0

Bu tabloda yer alan girdi parametreleri deprem analizlerinde kullanılacak olan üst yapı parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

Üst yapının davranışı temsil etmek amacı ile modellenen tek serbestlik dereceli sistemin yük altındaki tepkisini modellemek amacı ile bazı parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ve açıklamaları aşağıda verilen Tablo 3.2’de yer almaktadır. Bu parametrelerin bazıları izolatör özelliklerine bağlı olarak belli bir katsayı kullanılarak hesap edilmektedir. Örneğin üst yapının periyodu, izolatör periyodunun belli bir katıdır ve belirlenen bu katsayı ile izolatör periyodunun çarpımı sonucunda üst yapı periyodu elde edilmiştir. Tabloda verilen her bir değer belirli aralıklarda elli bin adet olarak üretilmiştir. Üretilen bu değerlerin dağılımı rastgele olarak belirlenmiştir. Dolayısı ile yapılacak olan analizlerde belli bir parametreye ilişkin sonuçların olabildiğince farklı kombinasyonları göz önüne alınarak analiz yapılmaya çalışılmıştır. Üst yapı parametreleri aşağıda yer alan Tablo 3.2’de açıklamaları ile birlikte verilmiştir. Üst yapı tek serbestlik dereceli olarak modellenirse de tüm yapı iki serbestlik derecesinden oluşmaktadır. İlk kat izolatör ve bu katın kütlesi olarak modellenmektedir. İkinci serbestlik derecesi ise üst yapı kütlesi ve üst yapı link elemanı olarak tanımlanabilir.

Tablo 3.2.Üst yapı parametreleri

Üst yapı Parametresi	Açıklamalar
-----------------------------	--------------------

Tablo 3. 2. Üst (devamı) yapı parametreleri

β	Üst yapı kütlelerinin toplam yapı kütlelerine oranı
γ	Akma kuvveti ile maksimum kuvvet arasındaki yer değiştirmenin akmadan sonraki toplam yer değiştirmeye oranı
α	Üst yapının maksimum kuvvetinin akma kuvvetine oranı
m_b	Yapıdaki izolatör katının kütlesi
m_s	Üst yapı kütlesi
m	Toplam yapı kütlesi
F_y	Akma dayanımı
F_u	Kopma dayanımı
k_s	Üst yapı rijitliği
u_y	Akma dayanımına tekabül eden deformasyon
u_p	Maksimum kuvvetteki deformasyon ile akma dayanımındaki deformasyon arasındaki fark
u_{pc}	Güç tükenmesi dayanımındaki deformasyon ile maksimum kuvvetteki deformasyon arasındaki fark
R_{uy}	Akma dayanımındaki deformasyon ile güç tükenmesi durumundaki deformasyon arasındaki deformasyon
W_s	Üst yapı ağırlığı
W_b	İzolatör katının ağırlığı
W	Toplam yapı ağırlığı
g	Yer çekimi ivmesi
T_s	Üst yapı periyodu
$coeffT_s$	Üst yapı periyodu katsayısı
c	Akma dayanımı (yield ratio)

Tablo 3.3'te izolatör parametreleri verilmektedir.

Tablo 3.3.İzolator parametreleri

İzolator Parametreleri	Açıklamalar
μ_1	İzolatorün yukarıda kalan yatağın sürtünme kuvveti katsayısı
μ_2	İzolatorün aşağıda kalan yatağın sürtünme kuvveti katsayısı
μ_3	Üç sürtünmeli sistemin üst kısmındaki büyük yatağın sürtünme kuvveti katsayısı
μ_4	Üç sürtünmeli sistemin alt kısmındaki büyük yatağın sürtünme kuvveti katsayısı
T_{eff}	İzolatorün periyodu
R_1	İzolatorün yukarıda kalan yatağın eğrilik yarıçapı
R_2	İzolatorün aşağıda kalan yatağın eğrilik yarıçapı
R_3	Üç sürtünmeli sistemin üst kısmındaki büyük yatağın eğrilik yarıçapı
R_4	Üç sürtünmeli sistemin alt kısmındaki büyük yatağın eğrilik yarıçapı
k_p	İzolatorün rijitliği
u	İzolatorün toplam yer değiştirmesi
u_1	İzolatorün yukarıda kalan yatağın yer değiştirmesi
u_2	İzolatorün aşağıda kalan yatağın yer değiştirmesi
u_3	Üç sürtünmeli sistemin üst kısmındaki büyük yatağın yer değiştirmesi
u_4	Üç sürtünmeli sistemin alt kısmındaki büyük yatağın yer değiştirmesi
$sign(\dot{u})$	İzolatorün hız değişimi (pozitif veya negatif)
F_{f1}	İzolatorün yukarıda kalan yatağın sürtünme kuvveti
F_{f2}	İzolatorün aşağıda kalan yatağın sürtünme kuvveti

Tablo 3.3. (devamı) İzolatör parametreleri

F_{f3}	Üç sürtünmeli sistemin üst kısmındaki büyük yatağın sürtünme kuvveti
F_{f4}	Üç sürtünmeli sistemin alt kısmındaki büyük yatağın sürtünme kuvveti
N_1	İzolatörün tepki kuvveti
θ	Eğrilik yarıçapı ile kayan kısmın merkezi ile arasındaki açı değeri
h_1	Kayıcı elemanın merkezi ile izolatörün üst kısmındaki yatağın alt kısmı arasındaki mesafe
h_2	Kayıcı elemanın merkezi ile izolatörün alt kısmındaki yatağın üst kısmı arasındaki mesafe
h_3	Kayıcı elemanın merkezi ile üç sürtünmeli sistemin alt kısmındaki büyük yatağın üst kısmı arasındaki mesafe
h_4	Kayıcı elemanın merkezi ile üç sürtünmeli sistemin üst kısmındaki büyük yatağın alt kısmı arasındaki mesafe
R_{eff}	Efektif yarıçap
d_1	Çift sürtünme yüzeyli izolatörün maksimum yer değiştirmesi

Tablo 3.4'te depremlere ait parametreler verilmektedir.

Tablo 3.4. Deprem parametreleri

Deprem Parametreleri	Açıklamalar
M_A	Artçı şokun büyüklüğü
M_m	Ana şokun büyüklüğü
V_{s30}	Zeminin üst 30 m kısmının sahip olduğu ortalama kayma dalgası hızı
R_{up}	Yırtılma mesafesi
SaM_m	Ana şokun ivme değeri

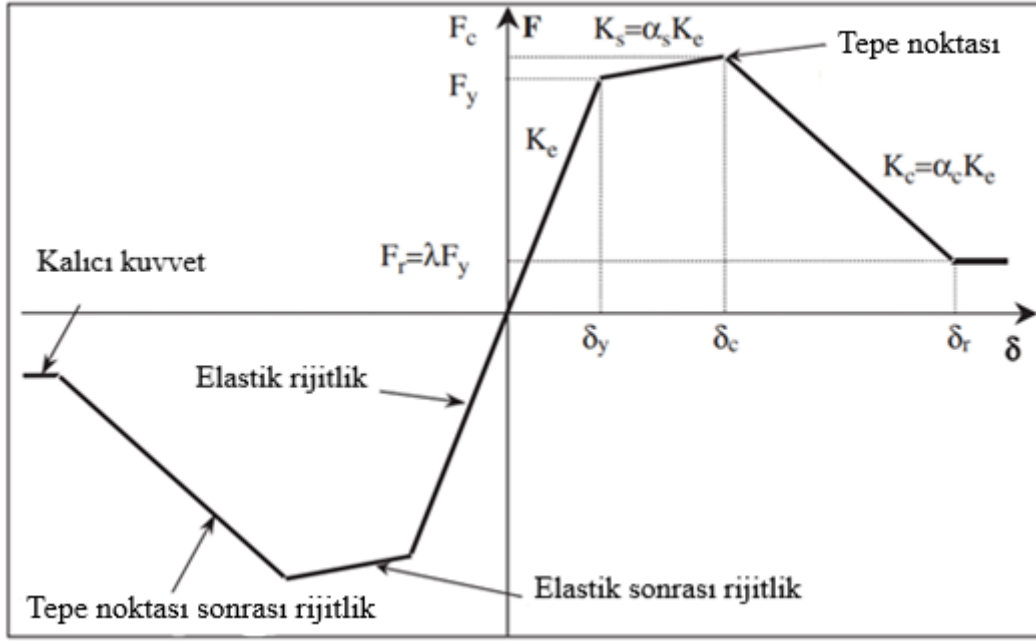
Tablo 3.5. (devamı) Deprem parametreleri

SaM_a	Artçı şokun ivme değeri
R_{rup}^{AS}	Artçı şok ivmesinin yırtılma mesafesi
R_{rup}^{MS}	Ana şok ivmesinin yırtılma mesafesi
f_{mag}	Depremlerin büyüklük değeri
f_{dis}	Depremlerin mesafesi
f_{site}	Depremler alanlarının büyüklüğü
$e^{\ln(\frac{Y^{AS}}{Y^{MS}})}$	Ana şok ivmesinin ve artçı şok ivmesinin
θ	Artçı şokun yapıya uygulamadan önce çarpılması gereken katsayı değeri

Sismik izolatörlerin parametreleri ile yapılmış çalışmalardan alınan veriler ve meydana gelen depremlerin büyüklükleri kullanılarak OpenSees programı yardımıyla yapılan analizler sayesinde tasarlanacak olan izolatörün özelliklerini ve yapı bilgilerini programa girerek, izolatörün ve yapının önceden nasıl davranış göstereceği hakkında bilgi sahibi olunacaktır.

İnşaat Mühendisliğinde tasarlanan yapıların amacına uygun yapılması, yapının ömrü boyunca dışarıdan etki edecek olan kuvvetlere karşı dayanımlı olması gerekmektedir. Tasarlanacak olan yapıların dışarıdan etki eden kuvvetlere karşı nasıl bir davranış sergileyeceği de önem arz eden konulardan biridir. Bu yüzden ki daha yapılmamış ve tasarım aşamasında olan yapının kuvvet etkisi altındaki durumunu önceden tahmin edip gerekli varsayımlarla birlikte en iyi sonuç göstermesi istenmektedir. Yalnız bu durumlar yapılırken hem estetik hem de maliyet olarak da hesap ve çözüm üretilmesi gerekmektedir. Bu şekilde dayanımlı, dayanıklı, estetik, maliyet açısından uygun ve istenilen özellikleri gösterebilen yapıların yapılması İnşaat Mühendisliği mesleğinin gerekliliklerindendir.

Yapının gelen kuvvetler karşısındaki dayanma kapasitesi ve deplasman yeteneğine bağlı olarak elde edilen kuvvet-deplasman grafiği yapı davranışı açısından bir çok parametreyi ve yapının bir depreme karşı vereceği tepkiyi açıklamada son derece önemlidir. Bu grafik aslında yapının akma kuvvetini ve bu kuvvete denk gelen yer değiştirmeyi ifade eden ve yapının maksimum gerilme kuvvetindeki şekil değiştirmesini veren bir grafikdir. Bu şekilde oluşturulan grafiğin eğimi ise bize “yapı rijitliğini” vermektedir.



Şekil 3.3. Histeretik eğriyi içerisine alan bir zarf eğrisi modeli (Kaynak: Ibarra vd., 2005)

Şekil 3.3 yapının hangi yer değiştirme değerinde elastik hangi yer değiştirme değerinde ise elastik olmayan (plastik) davranış göstereceğini ifade etmektedir. Buradaki K_e , elastik rijitliği, K_s elastoplastik rijitliği (pre-capping) ve K_c ise plastik rijitliği (post-capping) tanımlamaktadır.

δ_c , δ_y , λ , a_c ve a_s bu katsayılar diğer yapılan çalışmalardan ve deneylerden hem tahmin ile hem de hesaplama ile elde edilmiştir (Ibarra vd., 2005).

Bu çalışmada tasarlanan yapı modelinde kat adedinden bağımsız yapının kütlesi ve rijitlik değeri dikkate alınarak modeller hazırlanmıştır. Tasarlanan izolatör çift yüzeyli (double) ve üç yüzeyli (triple) sürtünmeli sarkaç tipli izolatörlerdir. Ama çift yüzeyli izolatörün R1 ve R2 eğrilik yarıçapları eşit; μ_1 ve μ_2 sürtünme katsayı değerleri de eşit olarak alındığından izolatör kuvvet-yer değiştirme grafiği tek yüzeyli (single) sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün grafiği ile benzer özellikler göstermektedir. Bunun yanı sıra tasarlanan üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörde ise R1 ve R4 ile R2 ve R3 eğrilik yarıçapları eşit; μ_1 ve μ_4 ile μ_2 ve μ_3 sürtünme katsayıları değerleri de eşit olarak alındığından bu izolatörün kuvvet- yer değiştirme grafiği de iki yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün grafiği ile benzerlik göstermektedir. Böylece elde edilen sonuçların hem tek, hem iki hem de üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemlerinin davranışı hakkında bilgi vermesi amaçlanmaktadır. Ayrıca deplasman kapasitesi açısından modelde bir sınırlamaya gidilmemiştir ancak sonuçların yorumlanmasında bazı filtrelemeler yapılmıştır.

3.2.Tasarlanacak Olan İzolatör ve Yapıya Ait Girdi Özellikleri

Belirlenen sarkaç tipli izolatörlerin (iki yüzeyli ve üç yüzeyli) parametrik ifadelerinin değer aralığı ve adedi aşağıdaki şekillerle gösterilmiştir. Seçilen iki yüzeyli ve üç yüzeyli sarkaç tipli izolatörlere ait bazı bilgiler şunlardır;

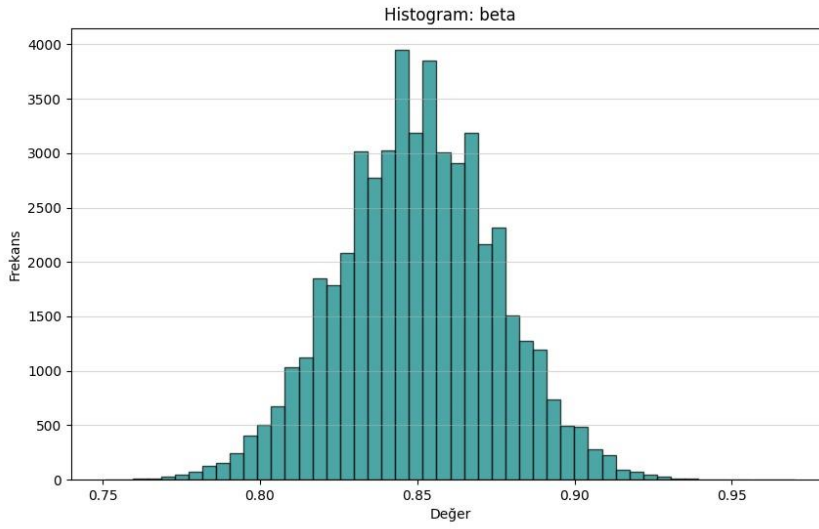
- ✓ İki yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün hem altta bulunan hem de üstte bulunan yüzeylerinin sürtünme kuvveti katsayıları eşit alınmıştır.
- ✓ İki yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün kayıcı elamanı ile kayıcı yüzeylerin arasındaki yükseklikler eşit alınmıştır.
- ✓ Üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün iç kısmında bulunan iki tabakanın sürtünme katsayıları aynı; alt kısmında bulunan yüzeyin sürtünme katsayısı ise üst kısımdaki yüzeyin sürtünme katsayısından küçük, iç kısımlarda bulunan yüzeylerin sürtünme katsayılarından büyüktür.
- ✓ Üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipli izolatörün iç kısmındaki kayıcı elaman ile kayıcı yüzeylerin arasındaki yükseklikler eşit alınmıştır.
- ✓ Her bir rastgele seçilen değer sayısının elli bin tane olarak alınmıştır.

Periyot olarak izolatörlerde meydana gelen elastik ötesi kuvvet-yer değiştirme grafiğinin eğimi rijitlik olarak hesap edilmiş ve periyot buna bağlı olarak belirlenmiştir. Çünkü üst yapının elastik bölgede rijit cisim hareketi yapacağı varsayılmıştır. İzolatörlere ait bilgiler Şekil 3.4-3.20’de verilmiştir.

m_b = sabit olarak alınacaktır. (20000 kg)

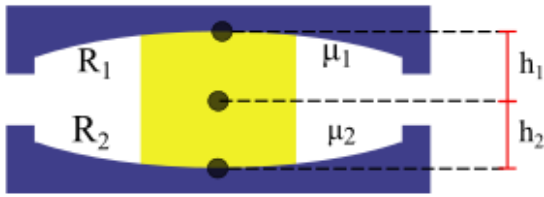
$$m_s = \frac{\beta \cdot m_b}{1 - \beta} \quad \beta = \frac{m_s \times g}{(m_s + m_b) \times g} = \frac{W_s}{W}$$

Denklem 3.1. Beta katsayısının elde edilmesi



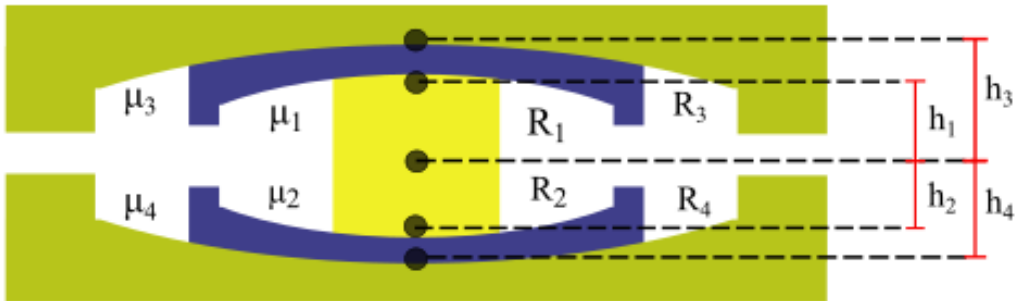
Şekil 3.4. Küteller arasındaki ilişkiye dayalı beta değer aralıkları ve kullanım sayıları

Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan iki yüzeyli ve üç yüzeyli izolatörlerin tipik görüntüsü Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.5. Çift sürtülmeli yüzeyli sarkaç tipli izolatör

$$\mu_1 = \mu_2, \quad R_1 = R_2, \quad h_1 = h_2$$



Şekil 3.6. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipli izolatör

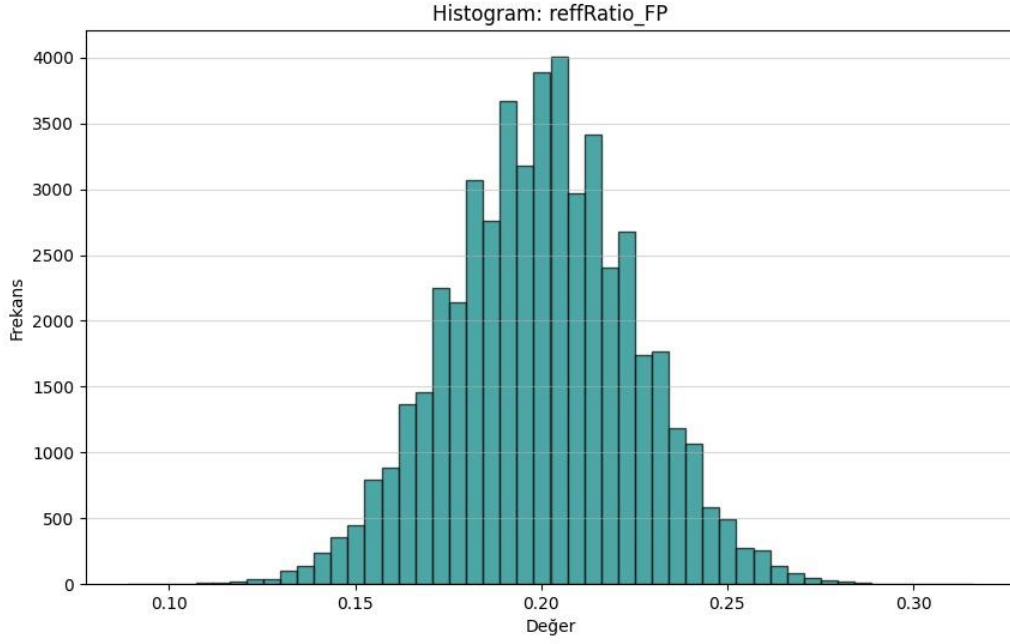
$$R_1 = R_2 < R_3 = R_4$$

$$\mu_1 = \mu_2 < \mu_4 < \mu_3$$

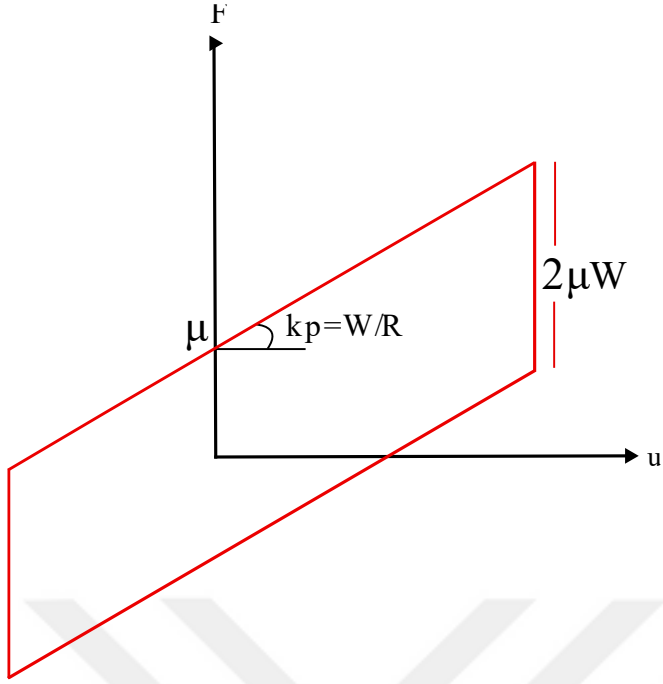
$$R_{effratio} = \frac{(R_1 = R_2)}{(R_3 = R_4)}$$

Denklem 3.2. Eğrilik yarıçaplarının oranı

$$h_1 = h_2 < h_3 = h_4$$



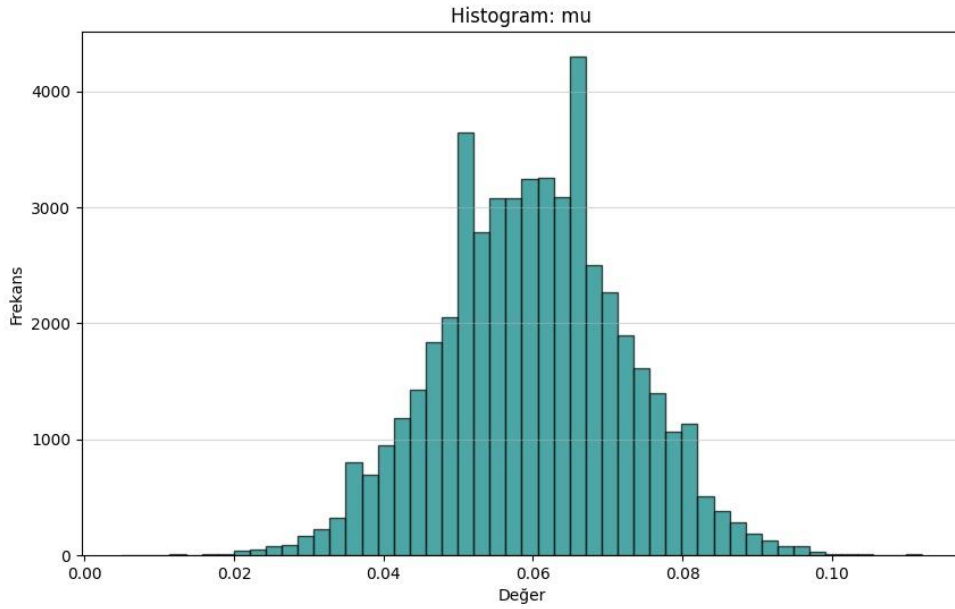
Şekil 3.7. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç sistemli izolatörün iç yüzeyinin eğrilik yarıçapının dış yüzeyin eğrilik yarıçapına oranının değer aralığı ve kullanım sayıları



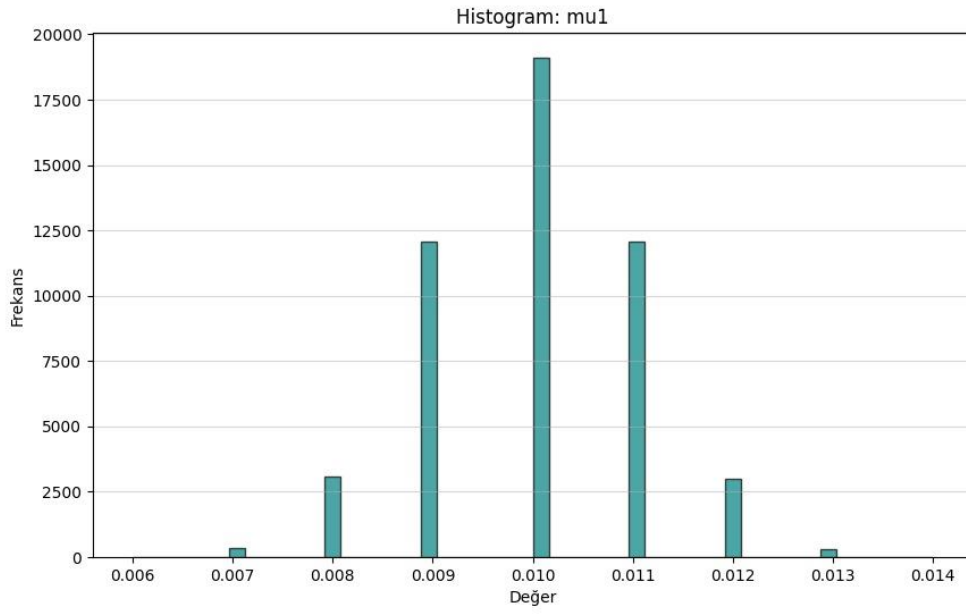
Şekil 3.8. Normalize edilmiş sarkaç tipli izolatörün kuvvet -deformasyon grafiği

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \text{sign}(\dot{u})$$

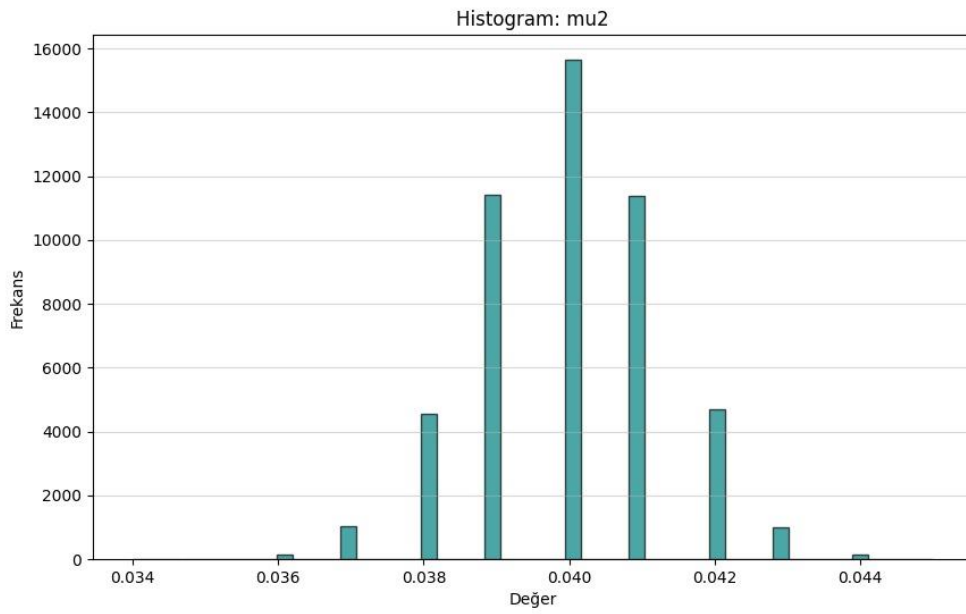
Denklem 3.3. İzolatöre etki eden kuvvetin elde edilmesi



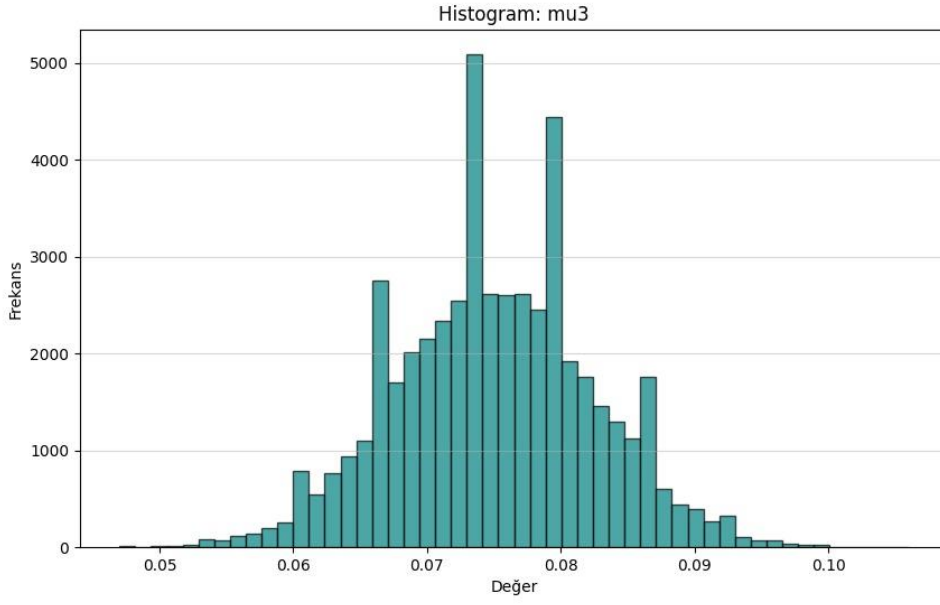
Şekil 3.9. Çift sürtünme yüzeyli sistemin her ikisi için de seçilen sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları



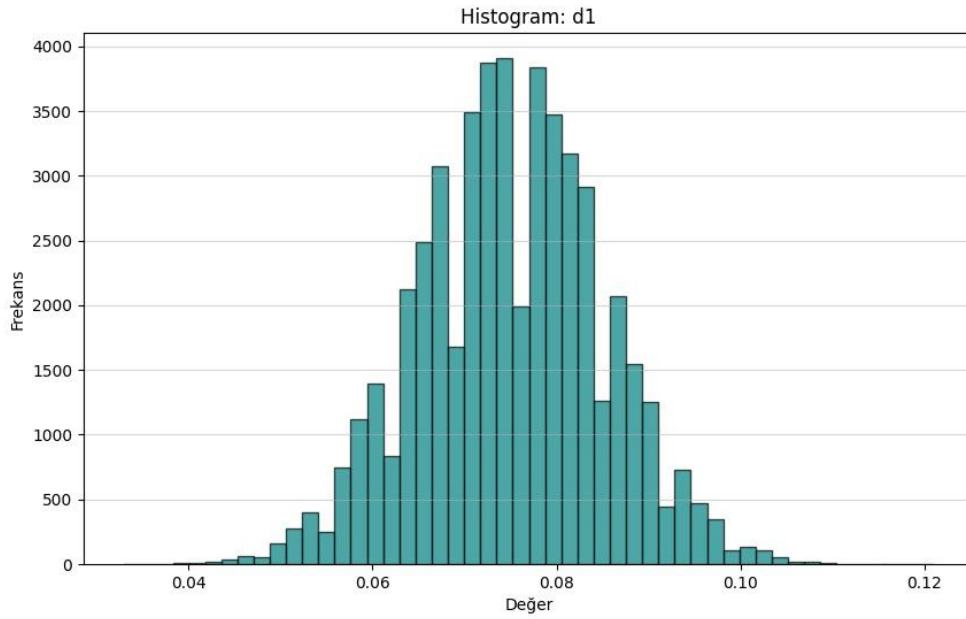
Şekil 3.10. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün iç kısmındaki kayıcı yüzeylerin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları



Şekil 3.11. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün alt kısmındaki kayıcı yüzeyin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları



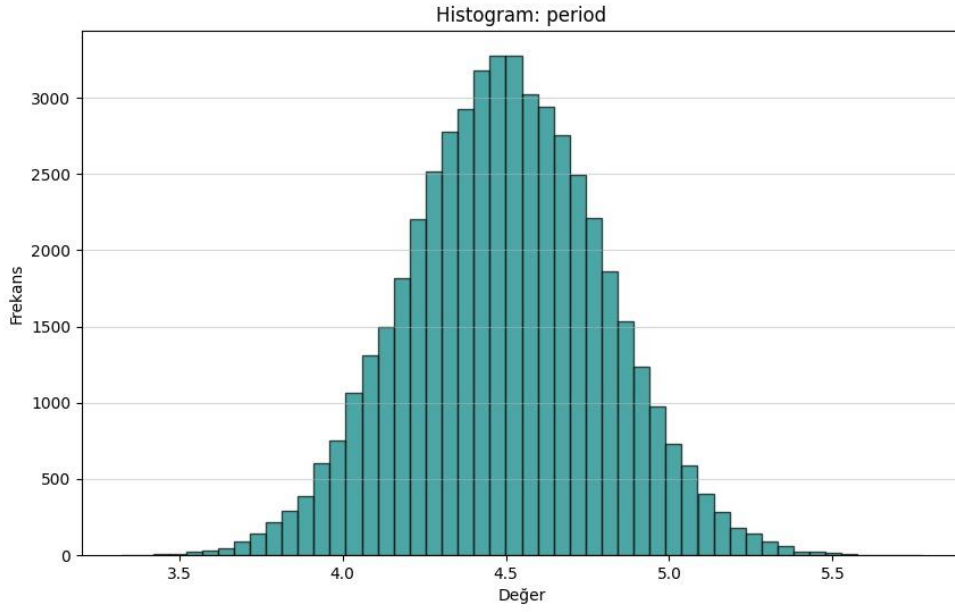
Şekil 3.12. Üç sürtünme yüzeyli izolatörün üst kısmındaki kayıcı yüzeyin sürtünme kuvveti katsayılarının değer aralığı ve kullanım sayıları



Şekil 3.13. İki sürtünme yüzeyli izolatörün maksimum yer değiştirmesinin değer aralığı ve kullanım sayıları

$$\tau_{eff} = 2\pi \times \sqrt{\frac{m=m_s+m_b}{k_b=\frac{W=W_s+W_b}{R}}} \quad T_{eff} = 2\pi \times \sqrt{\frac{mR}{mg}} \quad R = \left(\frac{T_{eff}}{2\pi}\right)^2 \times g$$

Denklem 3.4. Etketif periyot yardımıyla eğrilik yarıçapının elde edilmesi

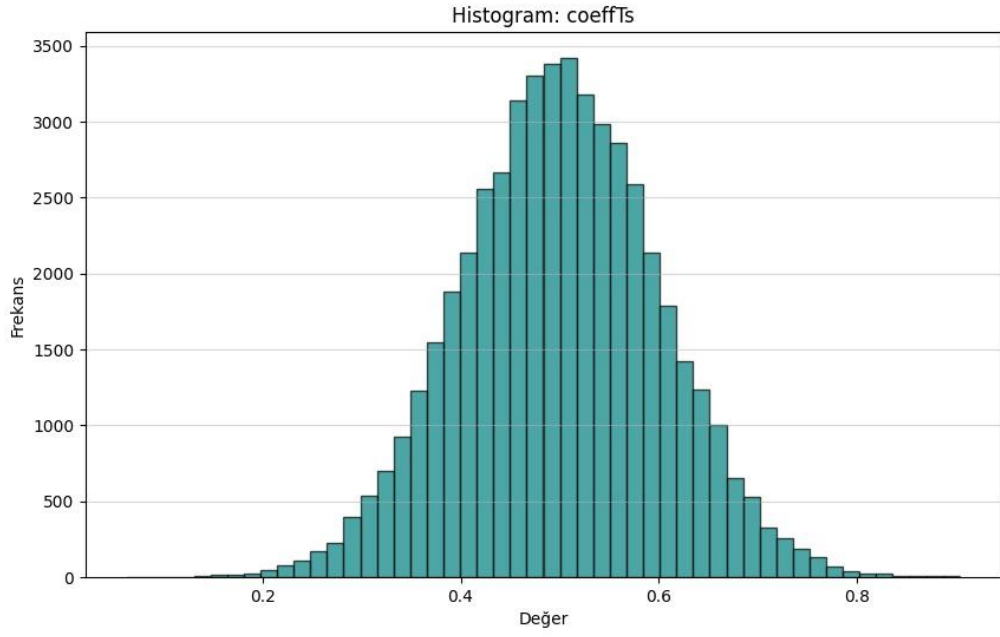


Şekil 3.14. İzolatörün eğrilik yarıçaplarını belirlemek için kullanılan efektif periyot değer aralığı ve kullanım sayısı

$$T_s = coeffTs \times T_{eff} \quad coeffTs = \frac{T_s}{T_{eff}}$$

Denklem 3.5. Yapı periyodunun efektif izolatör periyodu ve efektif yapı periyodu ile elde edilmesi

İki yüzeyli sürtünmeli sistemlerde doğrudan eğrilik yarıçapına bağlı olarak periyot değeri hesap edilmiştir. Ancak üç yüzeyli sürtünmeli sistemler de ise büyük olan eğrilik yarıçapı dikkate alınarak bu hesap yapılmıştır. Çünkü bu yüzeyde meydana gelen yer değiştirme diğer yüzeylere oranla daha fazla olmaktadır.



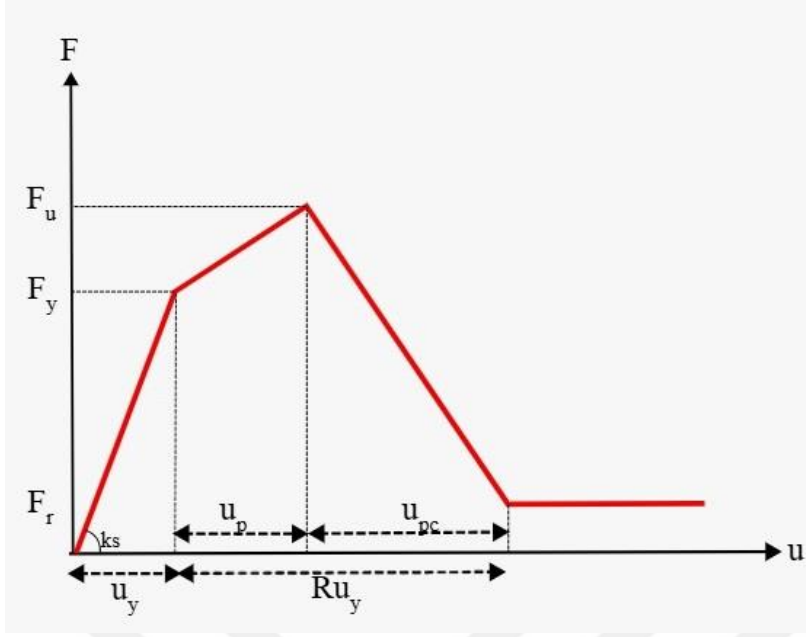
Şekil 3.15. Yapı periyodunu belirlemek için kullanılan katsayının değer aralığı ve kullanım sayıları

$$k_b = \frac{m}{\left(\frac{T_{eff}}{2\pi}\right)^2}$$

Denklem 3.6. İzolatörün rijitliği

$$k_s = \frac{m}{\left(\frac{T_s}{2\pi}\right)^2}$$

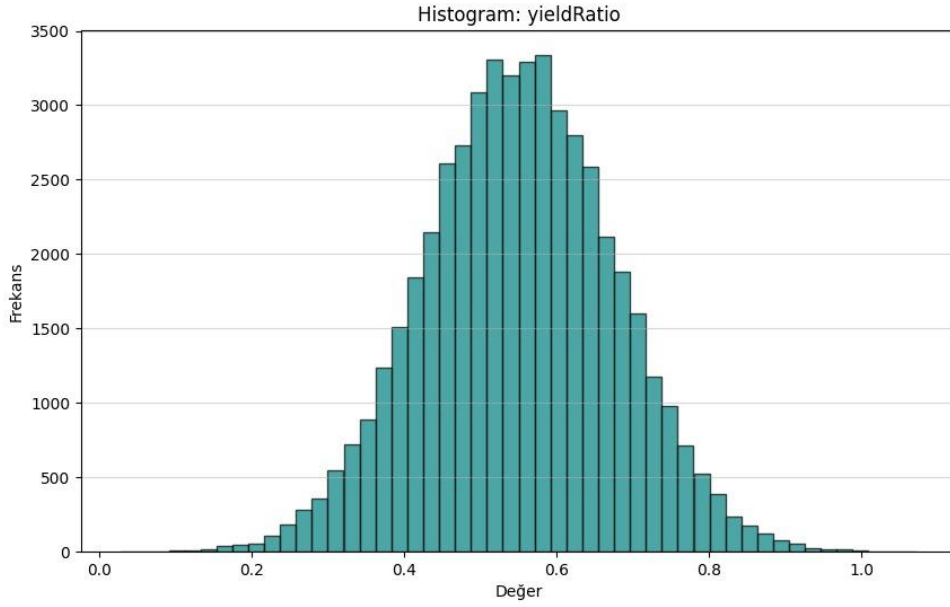
Denklem 3.7. Üst yapının rijitliği



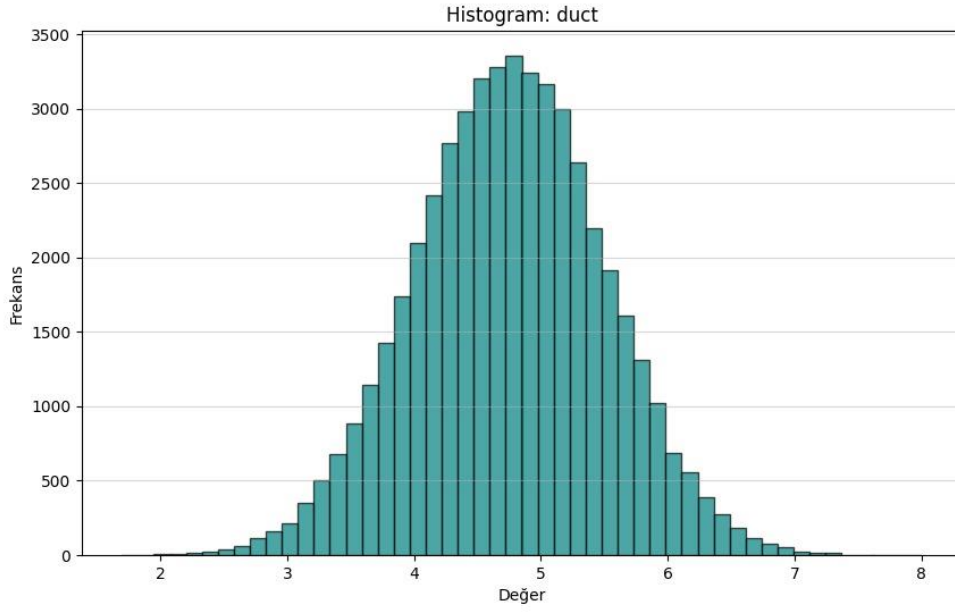
Şekil 3.16. Kuvvet etkisi altındaki bir yapının deformasyon grafiği

$$F_y = \text{yield ratio } (c) \times W_s$$

Denklem 3.8. Üst yapının akma dayanımının elde edilmesi



Şekil 3.17. Yapının akma dayanımını belirlemek için kullanılan akma dayanım oranının değer aralığı ve kullanım sayıları



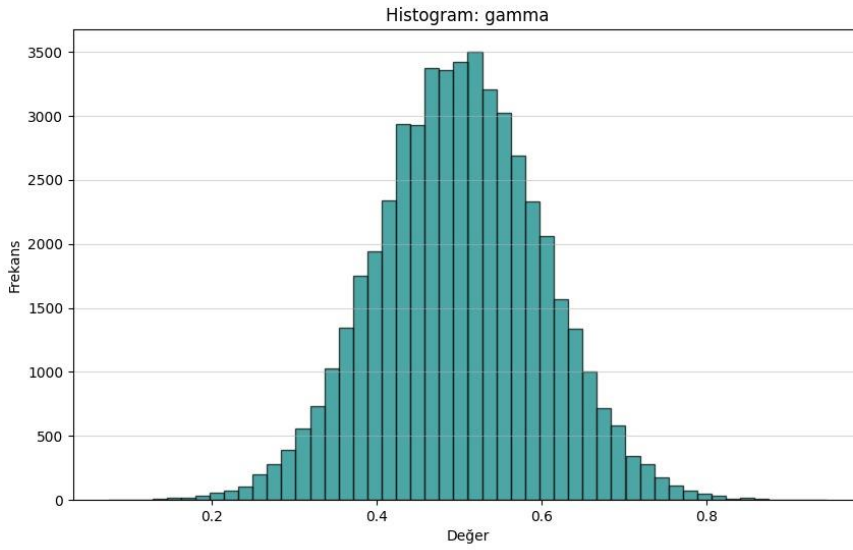
Şekil 3.18. Tekrarlı yükler altındaki yapının sünekliğinin değer aralığı ve kullanım sayıları (R_{uy}/u_y)

$$k_s = \frac{F_y}{u_y}, \quad u_y = \frac{F_y}{k_s}$$

Denklem 3.9. Üst yapı rijitliğine bağlı olarak elde edilen akma deformasyonu

$$u_p = \gamma \times duct \times u_y$$

Denklem 3.10. Akma yer değiştirmesi ile maksimum kuvvetteki şekil değiştirme arasındaki farkın gamma katsayısı ile akma deformasyonu cinsinden elde edilmesi



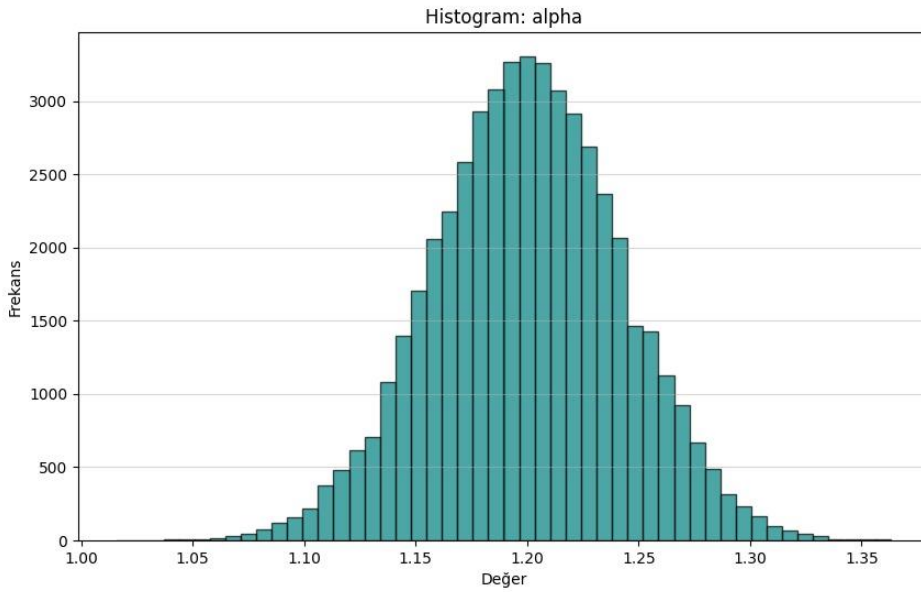
Şekil 3.19. Süneklik değerinin katsayısının değer aralığı ve kullanım sayıları

$$u_{pc} = duct \times u_y \times (1 - \gamma)$$

Denklem 3.11. Maksimum kuvvetteki şekil değiştirme ile güç tükenmesindeki şekil değiştirmenin farkının gamma katsayısı ile akma şekil değiştirmesi cinsinden elde edilmesi

$$\frac{F_u}{F_y} = \alpha, \quad F_u = \alpha \times F_y$$

Denklem 3.12. Maksimum kuvvetin akma kuvvetine oranı



Şekil 3.20. Yapının maksimum kuvvetinin akma kuvvetine oranının değer aralığı ve kullanım sayıları

Yukarıda verilen β , γ , μ , T_{eff} , coeff Ts, yield ratio (c), ductility (R_{up}), d_1 ifadelerinin değerleri Python programında rastgele olacak şekilde elli bin adet üretilmiş ve kullanılmıştır. Bu değerler alınırken bu alanda yapılan çalışmalar ile elde edilen sayı aralıkları dikkate alınmıştır.

3.3. Yapıya Uygulanacak Olan Ana Şok ve Artçı Şok Depremlerinin Elde Edilmesi

Yapılar kullanım süreleri boyunca birçok dış kuvvete maruz kalmaktadır. Bunların en önemlilerinden biri deprem etkisidir. Deprem yapıya olan etkisi oldukça fazladır ve insan yaşamını etkileme durumu öne çıkmaktadır. Deprem yapıya etki ettiği anda yapıyı yer değiştirmeye zorlanmaktadır. Dolayısıyla depremin karakteristiği oluşacak olan talepler ile doğrudan ilgilidir. Bu nedenle deprem analizinde kullanılacak olan yer hareketlerinin özellikleri sahada gözlemlenmesi beklenen depremin etkilerini oluşturacak nitelikte

olmalıdır. Yapılacak olan yapı performans değerlendirmeleri ise belli özelliklere sahip kayıtlar kullanılarak yapılmalıdır.

Bu çalışmada kullanılacak olan deprem yer hareketi her bir analiz için iki adettir. Bunlar ana şok ve artçı şok depremlerine ait yer ivmeleridir. Bu analizlerin yapılabilmesi amacı ile bir deprem yer hareketi kümesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu seride yer alan depremler “FEMA P695” (FEMA,2009) raporunda verilen ve hem yakın fay hem de uzak fay özelliklerine sahip depremlerden oluşmaktadır. FEMA P695’de bu özellikleri sahip toplam 50 adet deprem kaydı yer almaktadır ve bu deprem kayıtları (<https://sp3risk.com/ground-motion-sets/>) sitesinden elde edilmiştir. Elde edilen 50 farklı deprem her iki yönde kayıtlar barındırdığı için toplam yer ivmesi adedi 100 olmaktadır. Bunlardan 28 tanesi yakın fay 22 tanesi ise uzak fay hareketlerinden oluşur. Fayların yakın veya uzak olması depremin meydana geldiği mesafenin faya olan uzaklığına bağlıdır ve yapıların deprem performansı açısından önemlidir. Bu mesafe yaklaşık 10-15 km’den az ise “yakın fay”; daha büyük ise “uzak fay” olarak adlandırılmaktadır. Bu uzaklık depremlerin bazı özelliklerini etkiler. Örneğin uzak fayda gerçekleşen depremlerin yakın fayda gerçekleşen depremlere göre frekans ve ivme değerleri farklı olabilmektedir. Depremin odak uzaklığı yapıdan uzaklaştıkça meydana gelen talep değerleri de genellikle azalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan deprem ivme kayıtlarına ait bilgiler Tablo 3.5 ve 3.6’da verilmektedir. Bu tablolarda verilen RSN değeri PEER (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) veri tabanında yer alan numarayı ifade etmektedir.

Tablo 3.6. Uzak faya ait depremlerin özellikleri

RSN	MAGNİTÜD	YIL	YER (KONUM)	ZEMİN SINIFI	Vs_30 (m/sn)	Maksimum ivme (g)		PGV _{PEER} (cm/s.)
						1	2	
953	6.7	1994	Northridge	D	356	1.02	0.94	57.2
960	6.7	1994	Northridge	D	309	0.38	0.63	44.8
1602	7.1	1999	Duzce, Turkey	D	326	0.72	1.16	59.2
1787	7.1	1999	Hector Mine	C	685	0.35	0.37	34.1
169	6.5	1979	Imperial Valley	D	275	0.26	0.48	28.4
174	6.5	1979	Imperial Valley	D	196	0.24	0.23	36.7

Tablo 3.5. (devamı) Uzak faya ait depremlerin özellikleri

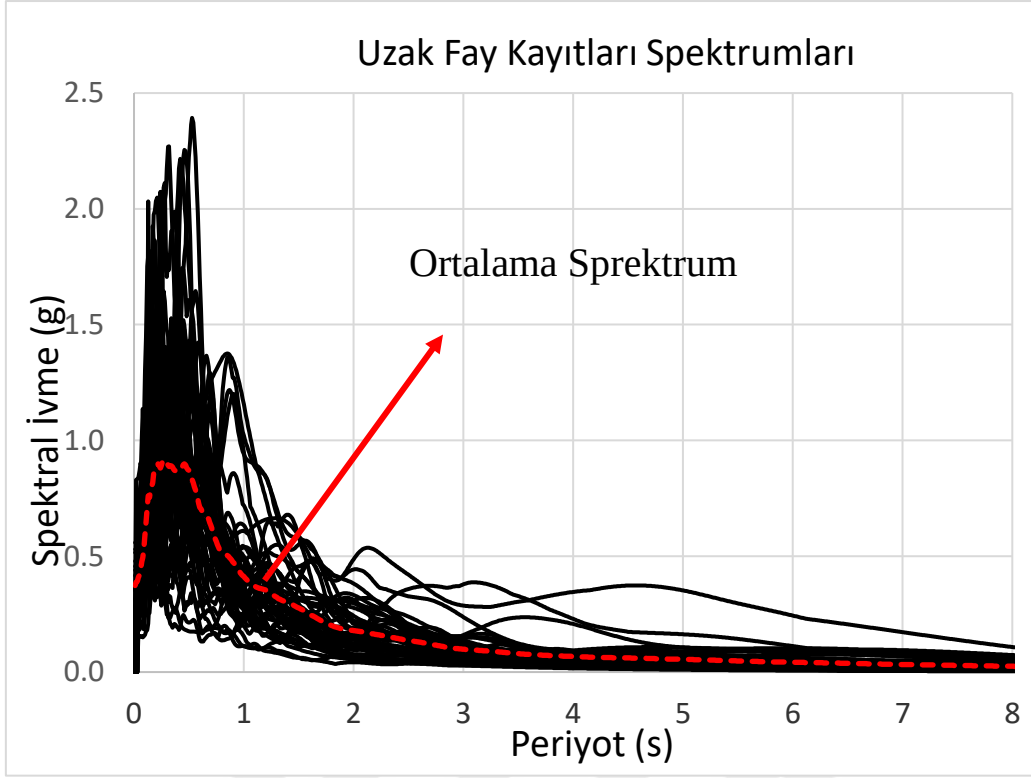
1111	6.9	1995	Kobe, Japan	C	609	0.31	0.29	36.0
1116	6.9	1995	Kobe, Japan	D	256	0.33	0.23	33.9
1158	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	D	276	0.43	0.61	54.1
1148	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	C	523	0.11	0.11	27.4
900	7.3	1992	Landers	D	354	0.50	0.33	37.7
848	7.3	1992	Landers	D	271	0.20	0.36	32.4
752	6.9	1989	Loma Prieta	D	289	0.46	0.28	34.2
767	6.9	1989	Loma Prieta	D	350	0.27	0.38	42.3
1633	7.4	1990	Manjil, Iran	C	724	0.35	0.54	47.3
721	6.5	1987	Superstition Hills	D	192	0.31	0.25	42.8
725	6.5	1987	Superstition Hills	D	208	0.33	0.34	31.7
829	7.0	1992	Cape Mendocino	D	312	0.54	0.39	45.4
1244	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	D	259	0.49	0.95	90.7
1485	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	C	705	0.30	0.43	38.8
68	6.6	1971	San Fernando	D	316	0.25	0.15	17.8
125	6.5	1976	Friuli, Italy	C	425	0.25	0.30	25.9

Tablo 3.7. Yakın faya ait depremlerin özellikleri

RSN	YIL	MAGNİTÜD	YER (KONUM)
181	1979	6.5	Imperial Valley-06
182	1979	6.5	Imperial Valley-06
292	1980	6.9	Irpinia, Italy-01
723	1987	6.5	Superstition Hills-02
802	1989	6.9	Loma Prieta
821	1992	6.7	Erzican, Turkey
828	1992	7.0	Cape Mendocino
879	1992	7.3	Landers

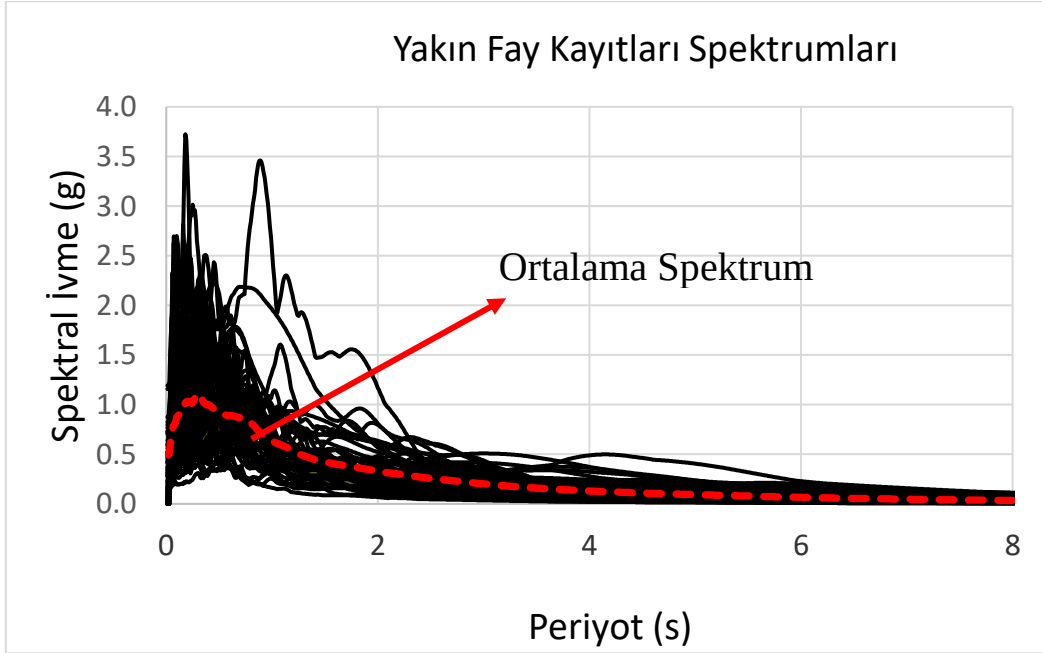
Tablo 3.6. (devamı) Yakın faya ait depremlerin özellikleri

1063	1994	6.7	Northridge-01
1086	1994	6.7	Northridge-01
1165	1999	7.5	Kocaeli, Turkey
1503	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan
1529	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan
1605	1999	7.1	Duzce, Turkey
126	1976	6.8	Gazli, USSR
160	1979	6.5	Imperial Valley-06
165	1979	6.5	Imperial Valley-06
495	1985	6.8	Nahanni, Canada
496	1985	6.8	Nahanni, Canada
741	1989	6.9	Loma Prieta
753	1989	6.9	Loma Prieta
825	1992	7	Cape Mendocino
1004	1994	6.7	Northridge-01
1048	1994	6.7	Northridge-01
1176	1999	7.5	Kocaeli, Turkey
1504	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan
1517	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan
2114	2002	7.9	Denali, Alaska



Şekil 3.21. FEMA P695 kayıtlarından alınan uzak faya ait spektral ivme .grafığı

Deprem ivme kayıtlarına ait spektrumlar ise Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmektedir. Bu şekillerde her bir deprem kaydına ait spektrum eğrisi ve bütün eğrilerin ortalaması da ayrıca verilmektedir. Bu verilen eğriler herhangi bir ölçeklendirmeye tabi tutulmamıştır.



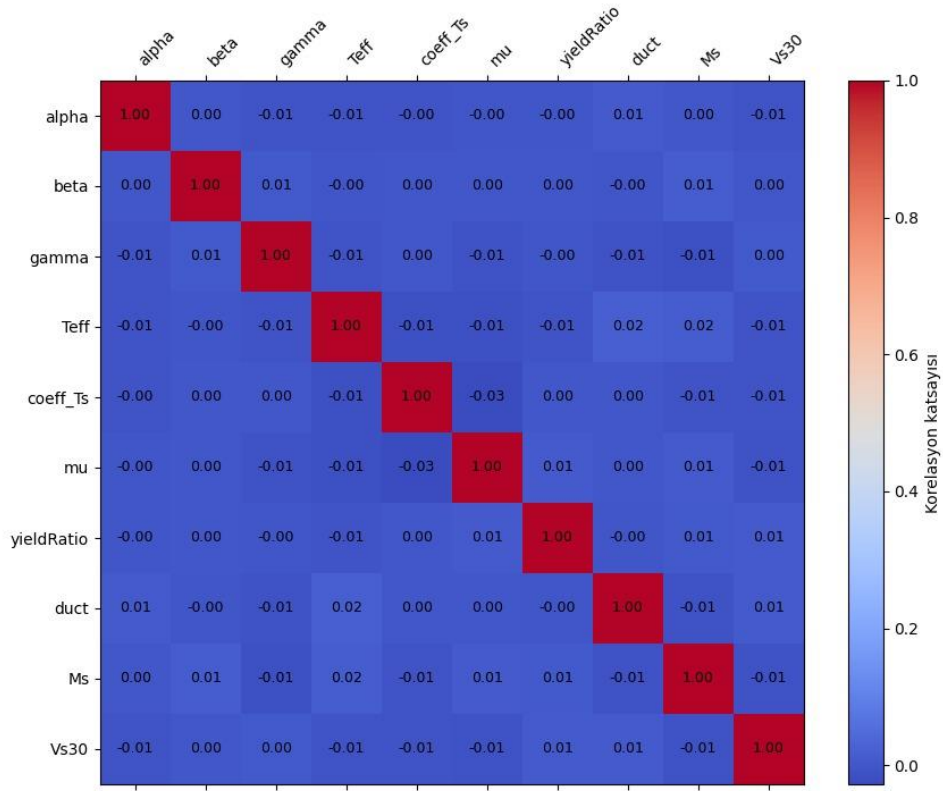
Şekil 3.22. FEMA P695 kayıtlarından alınan yakın faya ait spektral ivme .grafığı

Elde edilen depremler oluşturulan yapı modellerine rastgele uygulanmıştır. İlk önce ana şok olarak rastgele bir deprem seçilmiştir. Daha sonra ise ana şok depremi yapıya uygulandıktan sonra artçı şok depremi, yapı ana şok depremi sonundaki koşullarda iken yine rastgele seçilerek uygulanmıştır. Ancak ana şok ile artçı şok olarak uygulanacak olan depremlerin kendi içerisinde bir bütünlük sağlaması ve ayrıca sahada geçmiş depremlerde gözlenen özellikleri de taşıması gerekmektedir. Her ne kadar ana şok depremi rastgele seçilerek uygulansa da artçı şok olarak kullanılacak olan depremin ana şok karakteristiğine bağlı olarak ölçeklendirilmesi ve belli başlı özellikleri taşıması gerekmektedir. Bu nedenle her iki deprem arasındaki ilişkiyi açıklamaya çalışan bazı çalışmalar temel alınmıştır ve bu iki depremin spektral ivme değerlerinin oranının belli bir değere sahip olması amaçlanmıştır. Bu bağlamda Kim ve Shin (2017) tarafından verilen çalışma göz önüne alınmıştır. Bu çalışma kapsamında ana şok depremleri ile artçı şok depremleri arasındaki ilişki irdelenmiş ve bu iki depremin spektral ivme değerlerine ait oran verilmiştir.

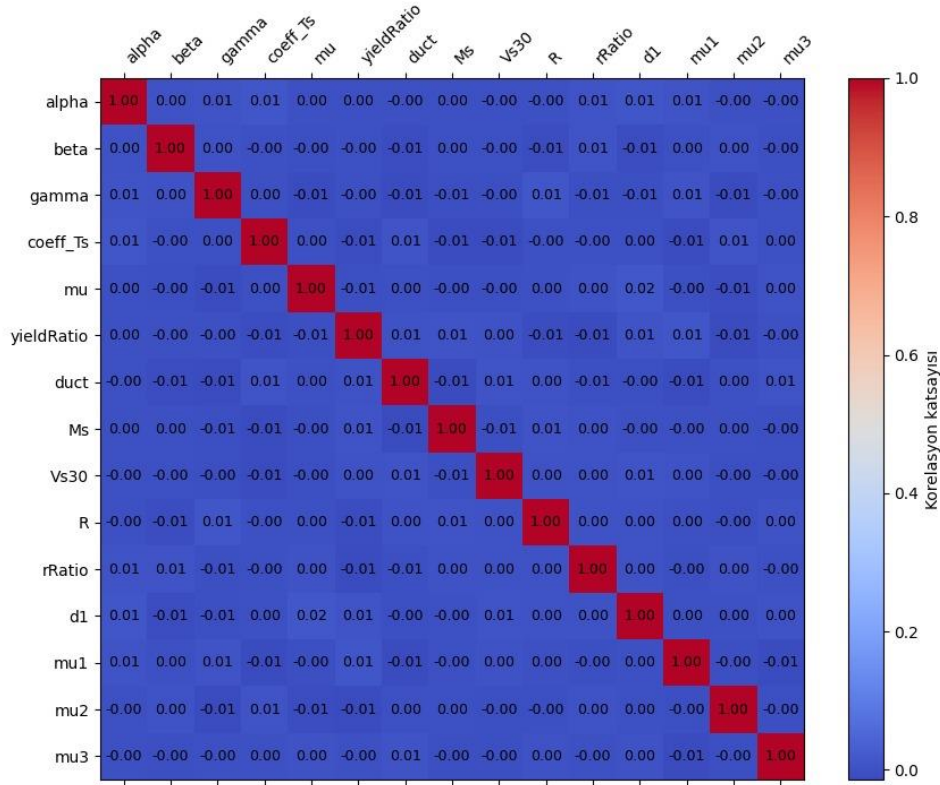
Literatürde yer alan ve ana şok ile artçı şok depremleri arasındaki ilişkileri spektral ivmeler bağlamında açıklayan ve dört farklı parametreye bağlı olarak Kim & Shin (2017) tarafından verilen ifade dikkate alınmıştır. Verilen spektral ivme değerlerinin oranı hesap edilirken izolatörlü yapılarda izolatörün elastik ötesi davranışı dikkate alınmıştır ve bu kısımdaki rijitlik periyot hesabında kullanılmıştır. Dört adet olarak belirlenen parametrelerden ilki zeminin üst 30 m kısmının sahip olduğu ortalama kayma dalgası hızı değeridir. İkincisi ise ana şok depreminin büyüklük değerinin artçı şok depreminin büyüklük değerine oranıdır. Bu oran için ise iki farklı makalede yer alan denklemler kullanılmıştır (Kim & Shin, 2017). Zhang vd. (2019), ana şok depreminin büyüklük değerine bağlı olarak artçı şok depremine ait büyüklük değerini tahmin etmek için denklemler önermektedir. Bu denklemler lineer olarak verilmiştir ve bu iki denklemde yer alan katsayıların standart sapma değerlerine bağlı olarak kullanılacak katsayılar seçilmiştir (Zhang vd., 2019). Dolayısıyla rastgele seçilen ana şok depreminin magnitüd değerine bağlı olarak artçı şok depremi hesap edilmiştir. Bir diğer parametre ise depremde meydana gelen yırtılma ile ilgilidir. Ana ve artçı şok depremlerinde meydana gelen yırtılmaların mesafeleri için bir oran ile belirlenerek hesaplarda kullanılmıştır. Son parametre ise periyot parametresidir. Çalışmanın spektrumu vermiş olması ve etkili periyot olan T_{eff} 'de meydana gelen ivme değerlerinin hesaplanması amacı ile işlemler yapılmıştır. Bu çalışmada yapılarda etkili olan periyot değeri izolatör periyodu olduğundan artçı şok ile ana şok arasındaki ilişkide bu periyot değeri göz önüne alınmıştır.

Elde edilen yüz adet deprem kaydına ait yer ivmelerinin spektrum değerlerine ait data dosyaları oluşturulmuştur. Şekil 3.21 ve 3.22’de verilen grafikler bir data dosyasına kaydedilmiştir. Analiz için geliştirilen program rastgele bir yer hareketi numarası seçtiğinde aynı zamanda bu yer hareketinin etkili periyot değerinde sahip olduğu ivme de bu data dosyasından alınmaktadır. Daha sonra yukarıda bahsedilen dört farklı parametreyi yine 50000 adet olarak önceden belirlenen bir seri içerisinde aldıktan sonra artçı şok ve ana şok arasındaki spektral değerlerin oranını hesaplamaktadır. Elde mevcut olan ve bilinen ana şok spektral ivmesi değerine bağlı olarak artçı şok depreminin sahip olması gereken spektral ivme değeri hesap edilmektedir. Daha sonra ise artçı şok depremi bir düzeltme katsayısı ile çarpılarak her iki depremin ivme oranları istenilen seviyede olmaktadır. Böylece rastgele seçilen ana şok ve artçı şok depremleri spektral ivme değeri açısından benzeştirilmiş olmaktadır.

Elde edilen yapısal parametreler ve izolatöre ait girdi parametrelerine ait korelasyon değerlendirmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda oluşturulan rastgele değişkenlerin birbirine olan bağıntıları incelenmiştir. Aşağıda verilen şekilde her bir parametrenin birbiri ile olan korelasyonunu gösteren bir harita verilmiştir. Bu haritada yer alan değerler incelendiğinde üretilen rastgele değişkenlerin birbirine çok az bağımlı olduğu görülmektedir. Bu göstermektedir ki bu girdi parametreleri birbirinden bağımsız ve rastgele seçilmiştir ve elde edilecek olan çıktıların olabildiğince geniş bir data havuzdan ve birbiri ile bağıntılı olmayan parametreler kullanılarak elde edileceği açıktır. Bu sonuçların güvenilirliği açısından önemli bir değerlendirmedir ve yapılan parametre seçimlerinin ve dağılımlarının yerinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.23. İki yüzeyli sürtünmeli sistem için girdi parametrelerine ait korelasyon ilişkisi



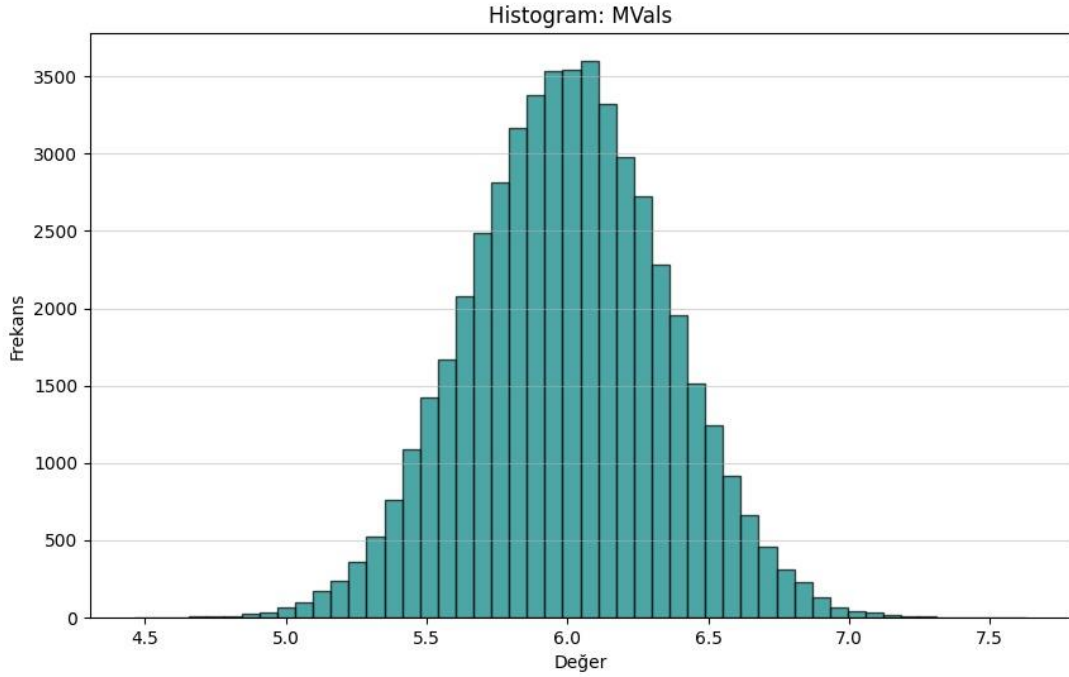
Şekil 3.24. Üç yüzeyli sürtünmeli sistem için girdi parametrelerine ait korelasyon ilişkisi

3.4. Depreme Ait Girdi Parametreleri

Zhang vd., (2019) yaptığı çalışmada ana şok büyüklüğüne bağlı olarak artçı şokun büyüklüğünün elde edilmesini sağlayan denklem üretmiştir. Ayrıca bu çalışmada belirtilen standart sapma ve hata oranlarına bağlı olarak katsayılar seçilmiştir. Aşağıda verilen Denklem 3.13 her iki deprem magnitüdü arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Zhang vd., 2019).

$$M_a = 0.58 M_s + 2.27$$

Denklem 3.13. Ana şok büyüklüğüne bağlı olarak artçı şok büyüklüğünün elde edilmesi



Şekil 3.25. Uygulanacak olan ana şokun büyüklük değer aralığı ve kullanım sayısı

Ayrıca Denklem 3.14-3.16, Kim & Shin, (2017) tarafından verilen ve magnitüd, mesafe ve zemin parametrelerine ait olarak hesaplanan değerlerdir. Bu değerlerin toplamına bağlı olarak Denklem 3.17’de verilen ilişki elde edilmektedir. Bu denklem ana şok ve artçı şok depremi arasındaki hız ve ivme gibi parametrelerin oranlarının doğal logaritmasını göstermektedir.

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 \left(\frac{M^{AS}}{M^{MS}} \right), & M^{AS}/M^{MS} \geq 0.75 \\ c_2 + c_3 \left(\frac{M^{AS}}{M^{MS}} \right), & M^{AS}/M^{MS} < 0.75 \end{cases}$$

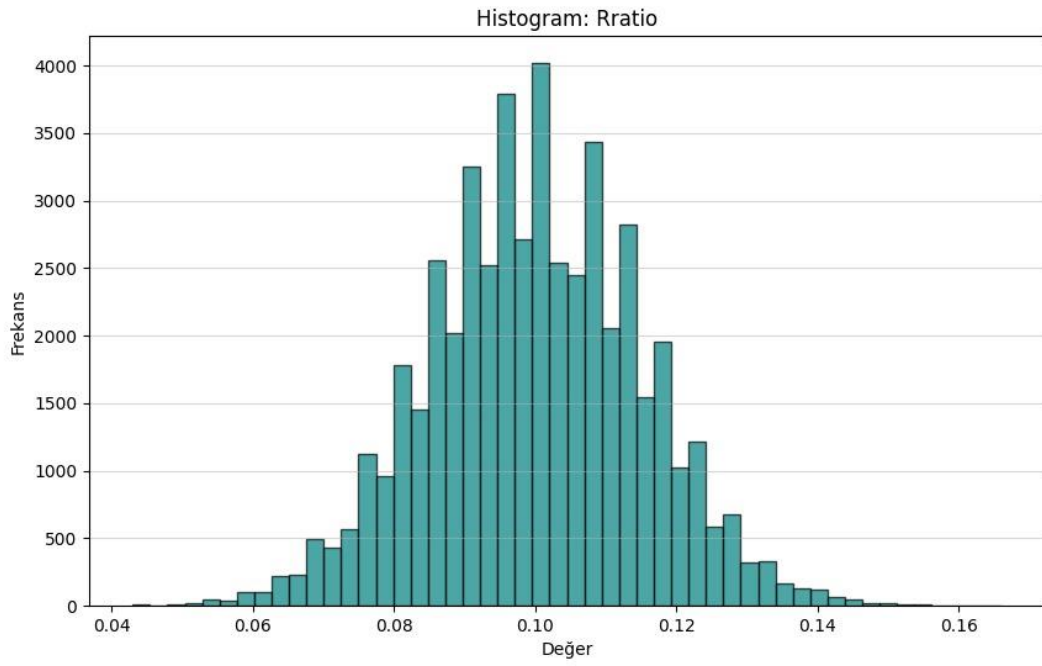
Denklem 3.14. Magnitüd fonksiyonunun elde edilmesi

$$f_{dist} = \left(c_4 + c_5 \ln \left(\frac{R_{rup}^{AS}}{R_{rup}^{MS}} \right) \right) \times \left(1 - \frac{M^{AS}}{M^{MS}} \right)$$

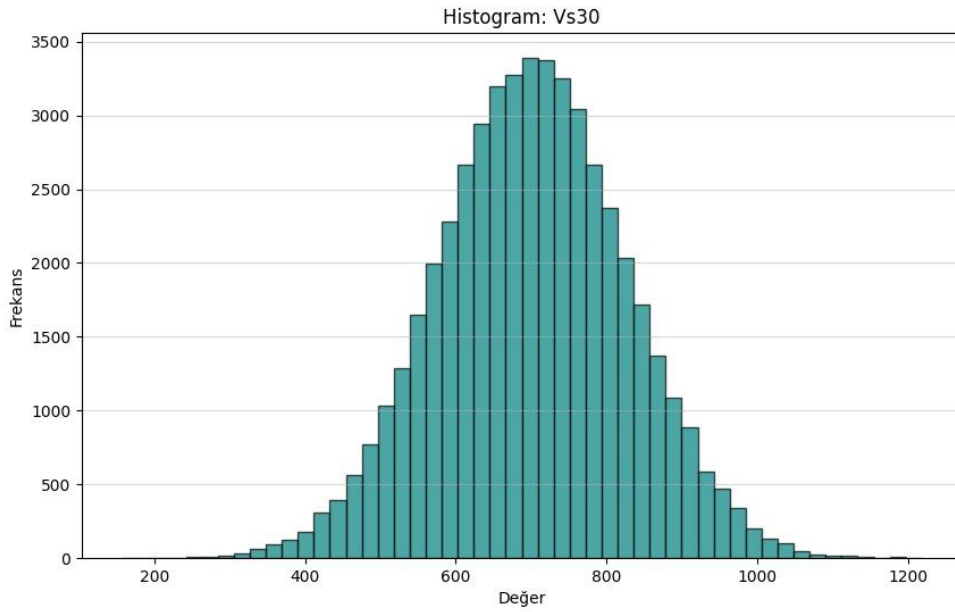
Denklem 3.15. Mesafe fonksiyonunun elde edilmesi

$$f_{site} = (c_6 \ln(V_{s30})) \times \left(1 - \frac{M^{AS}}{M^{MS}} \right)$$

Denklem 3.16. Alan fonksiyonunun elde edilmesi



Şekil 3.26. Artçı şokun ve ana şokun yırtılma mesafeleri oranının değer aralığı ve kullanım sayısı



Şekil 3.27. Zeminin üst 30 m kısmının sahip olduğu ortalama kayma dalgası hızının değere aralığı ve kullanım sayısı

$$\ln \left(\frac{Y^{AS}}{Y^{MS}} \right) = f_{mag} + f_{dist} + f_{site} = SR$$

Denklem 3.17. Artçı şok ve ana şokun ivmelerinin oranının ln değeri

Bu çalışmada, Y^{AS} ve Y^{MS} ifadeleri yapının doğal titreşim periyoduna karşılık gelen spektral ivme değerlerini temsil etmektedir. Denklem 3.18-3.19’da verilen SaM_a artçı şok depreminin sahip olduğu ivme, SaM_s ise ana şok depreminin sahip olduğu spektral ivme değeridir. θ katsayısı ise artçı şok deprem ivmesinin çarpılması gereken katsayı olarak ifade edilmektedir. Böylece her iki depremin spektral ivme oranları olması gereken değer ile yapıya uygulanacaktır ve artçı şok depremi yapıya uygulanırken burada verilen θ katsayısı ile çarpılacaktır.

$$SR = \frac{\theta \times SaM_a}{(SaM_m)}$$

Denklem 3.18. İvmesel oran

$$\theta = \frac{SR \times SaM_m}{SaM_a}$$

Denklem 3.19. Artçı ivmesinin yapıya uygulanmadan önce çarpılması gereken katsayı

Aşağıda verilen Tablo 3.7.’de ivme oranlarını elde etmek için kullanılan formüllerdeki sabit katsayılar bulunmaktadır. Kim & Shin, (2017) tarafından verilen bu katsayılar hem belirli bir periyoda sahip yapı için spektral ivme oranlarının hesabında kullanılacak değerler hem de maksimum yer hızı ve ivmesi için kullanılacak değerleri kapsamaktadır.

Tablo 3.8. İvme oranlarını elde etmek için kullanılacak olan katsayılar tablosu

Period(s)	a_{c0}	a_{c1}	a_{c2}	a_{c3}	a_{c4}	a_{c5}	a_{c6}	$a_{\mu R}$	τ	φ	$a_{\sigma R}$
0.01	-0.9294	10.744	-0.6505	0.7026	48.753	-1.4808	-1.9265	-0.1233	0.5946	0.5797	0.8304
0.02	-0.8355	0.966	-0.6799	0.7586	49.336	-1.5390	-1.9279	-0.1285	0.6083	0.5807	0.8409
0.03	-0.8180	0.9292	-0.5398	0.5583	57.750	-1.6705	-2.0449	-0.1372	0.6346	0.588	0.8409
0.05	-0.8467	0.9516	-0.3729	0.3198	72.372	-1.5885	-2.2503	-0.1450	0.5957	0.5964	0.8429
0.075	-1.4183	15.803	-0.0740	-0.2121	86.261	-1.2463	-2.4699	-0.1376	0.5655	0.6055	0.8439
0.1	-1.1016	12.078	-0.7238	0.7041	74.719	-1.2055	-2.3022	-0.1322	0.5741	0.6185	0.8439

(Kaynak: Kim & Shin, 2017)

Tablo 3.7.(devamı) İvme oranlarını elde etmek için kullanılacak olan katsayılar tablosu

0.15	-1.5897	19.086	-1.7375	20.055	60.734	-1.4401	-2.1148	-0.0970	0.5649	0.589	0.8161
0.2	-1.6151	18.602	-1.7476	19.535	50.250	-1.4823	-2.0359	-0.0240	0.5787	0.5776	0.8176
0.25	-1.6883	18.975	-1.7574	19.198	42.049	-1.5706	-1.9381	0.00	0.5917	0.5927	0.8385
0.3	-1.9146	21.432	-1.7797	18.834	35.210	-1.2961	-1.9062	0.00	0.5924	0.5976	0.8415
0.4	-2.3164	26.458	-1.8788	19.056	25.118	-1.1958	-1.8127	0.00	0.6333	0.6099	0.8815
0.5	-2.2729	25.300	-1.9723	21.293	19.235	-1.3664	-1.7819	0.00	0.6685	0.6077	0.9034
0.75	-2.5006	26.591	-2.1991	23.838	0.3298	-1.3598	-1.6166	0.00	0.6916	0.6249	0.9455
1	-2.8109	31.240	-2.3127	25.198	-1.0155	-1.3173	-1.5325	0.00	0.6835	0.6351	0.953
1.5	-2.9131	31.015	-2.4623	26.171	-2.1885	-1.7387	-1.3726	0.0602	0.7583	0.6355	0.944
2	-2.5519	27.151	-2.5480	28.199	-3.6256	-1.9646	-1.2804	0.0916	0.6783	0.6149	0.944
2.5	-2.1054	20.118	-2.5049	27.077	-4.2363	-2.3002	-1.1757	0.1197	0.7059	0.6302	0.944
3	-2.1770	20.631	-2.2724	23.103	-4.6222	-2.6289	-1.1505	0.125	0.703	0.6198	0.954
4	-5.5590	59.164	-0.8579	-0.2351	-3.5647	-3.0216	-1.2555	0.125	0.7341	0.6615	0.9845
5	-6.8793	74.027	-0.7536	-0.7649	-2.0961	-3.4989	-1.4309	0.125	0.7194	0.7231	10.183
6	-8.1869	88.159	-1.4243	-0.3243	-0.5194	-3.8624	-1.5920	0.125	0.7293	0.7197	10.265
7.5	-10.1668	109.872	-3.5027	21.552	15.195	-4.1258	-1.8572	0.15	0.7194	0.7757	10.510
10	-10.7176	114.440	-5.7628	48.436	35.829	-4.2479	-2.1864	0.3695	0.7869	0.8305	11.548
PGA	-0.9800	11.319	-0.6272	0.6615	48.687	-1.4771	-1.9274	-0.1213	0.5919	0.5791	0.8281
PGV	-1.6631	18.748	0.2639	-0.6946	-0.9755	-2.7424	-1.2792	-0.0689	0.5817	0.5939	0.8313

(Kaynak: Kim & Shin, 2017)

Yukarıda verilen formüller ve değerler Python programlama dilinde hazırlanan bir program yardımı ile kullanılarak spektral ivme oranları her bir yapı için hesap edilmektedir.

OpenSees programının ayrıca Python’da bir kütüphane olarak bulunması yapılacak olan analizleri ve rastgele seçilen parametrelerin seçimlerini ve gerekli hesaplamaların bir bütün olarak yapılmasını kolaylaştırmaktadır. İlk önce üretilen 50000 adet üst yapı ve izolatör parametresine bağlı olarak yapılan seçim sonucunda yapısal model oluşturulmaktadır. Daha sonra ise deprem ivmelerinin rastgele seçilmesi ve yapıya ayrı ayrı olarak uygulanması aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada yapının artçı şok depremi öncesindeki durumu ana şok depreminin uygulanması sonrasında yapıda meydana gelen kalıcı talep değerleri olarak alınmaktadır ve yapı ve izolatör belli bir etki altında iken artçı şok kaydı hesaplanan katsayı ile ölçeklendirilerek yapıya uygulanmaktadır.

Deprem parametreleri için ifade edilen Denklem 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 Kim ve Shin (2017) tarafından yapılan çalışmadan alınarak kullanılmıştır (Kim & Shin, 2017).

4. BULGULAR

Elde edilen elli bin adet parametreye bağılı olarak yapılan deprem analizleri sonucunda yapıda ve izolatörlerde meydana gelen maksimum kuvvet ve maksimum yer değıştirme değerleri yapısal tepkiler olarak kaydedilmiştir ve incelenmiştir. Ayrıca deprem analizleri sonucunda kalıcı izolatör, kalıcı yapı deplasmanı, kalıcı izolatör ve kalıcı yapı kuvveti de kaydedilmiştir. Bu tepkiler çalışma kapsamında elde edilen ve irdelenen tepkilerdir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bu tepkiler sadece ana şok ve ana şoka ek olarak artçı şok depreminin de etki etmesi durumunda ayrı ayrı olarak deprem analizleri sonucunda çıktı dosyasına kaydedilmiştir. Ana şok depremi sonucunda elde edilen tepkiler artçı şok depreminin sonunda da belirlenmiştir. İncelenen her bir tepki bir oran ifadesi kullanılarak her iki deprem arasındaki fark belirtilmiştir. Ana şok depremi sonrası oluşan talep değerleri ayrıca artçı şok depremi sonucunda oluşan talep değerleri ile normalize edilmiştir. Böylece her bir tepkiye ait “oran” ifadesi bulunmuştur. Yapılan elli bin deprem analizi sonucunda bu oranın 1’den büyük olduğu yani ana şok ve artçı şok tepkisinin sadece ana şok depreminden elde edilen tepkiden büyük olduğu durumlar ve bir bütün olarak elde edilen tüm datalar araştırılmıştır. Bu araştırmalar yapılmadan önce elde edilen data serisi içerisinde barındırdığı ve sonuçların yorumlanmasında hata oluşturabilecek değerlerden temizlenmiştir. Bazı aykırı değerlerin ayıklanarak güvenilir bir serinin elde edilmesi amacıyla da seri işleme tabi tutulmuştur. Çok küçük ve büyük taban deplasmanına neden olan depremlerin seriden çıkarılması amacıyla hem ana şok hem de artçı şok depremleri sonucunda meydana gelen taban deplasman değerleri baz alınarak maksimum izolatör deplasmanının 1.5 m’den büyük, minimum izolatör deplasmanının ise 5 cm ‘den küçük olduğu durumlar seri içerisinden elenmiştir. Ayrıca yapılan deprem analizleri sırasında simölasyonun yakınsayıp yakınsamadığının da kontrolü yapılmıştır. Hem ana şok hem de artçı şok depremi için bir ve sıfır katsayıları tanımlanarak bir gösterge oluşturulmuştur. Bu göstergenin 1 olması durumunda deprem analizinin yakınsadığı; 0 olması durumunda ıraksadığı anlaşılmaktadır. Hem artçı hem de ana şok depreminin bir olduğu yani yakınsadığı durumlar göz önüne alınmıştır. Elde kalan seriden hesap edilen tepki oranı daha sonra serinin güvenilirliğinin arttırılması amacıyla başka bir işleme daha tabi tutulmuştur. Bu tepki oranının aritmetik ortalaması ve standart sapma değeri hesap edilmiş ve sadece aritmetik ortalama -2 standart sapma değerinden büyük ve aritmetik ortalama + 2 standart sapma değerinden küçük olan datalar tepki değerlendirmesinde kullanılmıştır. Böylece elde edilen örnek uzay içinde yer

alan çok küçük ve çok büyük değerler de ayrıca elenerek elde edilen nihai örnek uzayın güvenirliliği arttırılmıştır.

İlk önce ana şok depremi uygulanmış ve yapı deprem etkisi bittikten sonraki hali ile artçı şok depremine maruz bırakılmıştır. Ana şok depremi sonrasında artçı şok depremi uygulanmadan önce belirlenen çıktı parametreleri kaydedilmiştir. Bu parametreler ayrıca artçı şok depremi sonrasında da kaydedilip farklı tepkilerin ne şekilde değiştiğinin araştırılması amacı ile belirtilen tepki oranı hesap edilmiştir. Yapılan oranlama Denklem 4.1’de gösterilmiştir.

$$Oran = \frac{(ana\ şok\ ve\ artçı\ şok\ etkisi)}{ana\ şok\ etkisi} = x$$

Denklem 4.1. Oran olarak tanımlanan ifadenin açılımı

Girdi parametresi olarak iki yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörlü sistemler için 10 adet değişken belirlenerek tepkiler araştırılmıştır. Bu parametreler daha önce belirtilen alpha, beta, gamma, teff, coeffTs, mu, yield ratio, ductility, ana şok depreminin magnitüd değeri (Ms) ve zeminin üst 30 metresindeki ortalama kayma dalgası hızı (Vs30) olarak belirlenmiştir. Üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemlerinde ise bu belirlenen parametrelere ek olarak izolatörün iç yüzeyin eğrilik yarıçapının dış yüzeyin eğrilik yarıçapına oranı olarak belirtilen oran (Rratio) ve izolatörün üç yüzeyine ait sürtünme değerleri belirlenmiştir.

Kalıcı yapısal kuvvete ilişkin oran değerinin hesaplanmasında her iki deprem sonrasında da üst yapı ağırlığının %0.1’den büyük kuvvetler dikkate alınmıştır. Benzer şekilde kalıcı izolatör kuvvetinin hesabında ise toplam yapı ağırlığının %0.1’den büyük kuvvetler dikkate alınmıştır. Bunun nedeni çok küçük kuvvetlerin seri içerisinde elenerek belli bir büyüklükteki değerlerin dikkate alınmasıdır.

İki yüzeyli sürtünmeli sarkaç sisteminden elde edilen tepki oranları değeri aşağıda verilen Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Çıktı olarak elde edilen tepki değerleri oranı ana ve artçı şok depremi etki etmesi durumunda elde edilen değerin sadece ana şok depreminden elde edilen değere bölünmesi ile elde edilmiştir. Tabloda seri içerisinde yer alan bütün dataların ortalaması ve sadece oran değerinin birden büyük olduğu dataların da ortalaması verilmiştir. Buna ek olarak her bir seri içerisinde kaç adet değerin bulunduğu da tablo içerisinde gösterilmiştir. Bu tablo göstermektedir ki yapıda meydana gelen maksimum deplasman

değeri tüm kayıtlar dikkate alındığında yaklaşık olarak %3 civarında bir artış göstermiştir. Sadece birden büyük değerler dikkate alındığında ise bu oran 2.14 olmaktadır. İzolatörde meydana gelen maksimum yer değiştirme değeri incelendiğinde ise tüm kayıtların ortalamasından elde edilen tepkinin artış değeri yaklaşık olarak %3'tür. Artçı şok depremlerinin kalıcı talepler üzerinde etkisinin ise belirgin olduğu görülmektedir. Kalıcı kuvvet ve yer değiştirme değerlerinde, oran bütün değerler için yaklaşık 2.0-2.5 arasında elde edilmiştir. Tüm seri içerisindeki datalar incelendiğinde maksimum yapı kuvveti, maksimum izolatör kuvveti ve yapı ile izolatör arasındaki deplasman farkını belirten maksimum rölatif deplasman değerlerinde bir artış olmamıştır. Ancak birden büyük değerler dikkate alınır ise yapı kuvvetinde %37'lik bir artış gözlenmektedir ve bu değer hesabında yer alan data sayısı ise yaklaşık tüm analiz değeri olan elli bin değerinin %10, maksimum yapı kuvvetinde tüm data için filtrelemeyen sonra elde edilen data değerinin ise yaklaşık üçte biridir. Maksimum izolatör kuvvetinde ise birden büyük değerlerin ortalama 1.2 ve toplam data sayısı yaklaşık 6000 civarındadır.

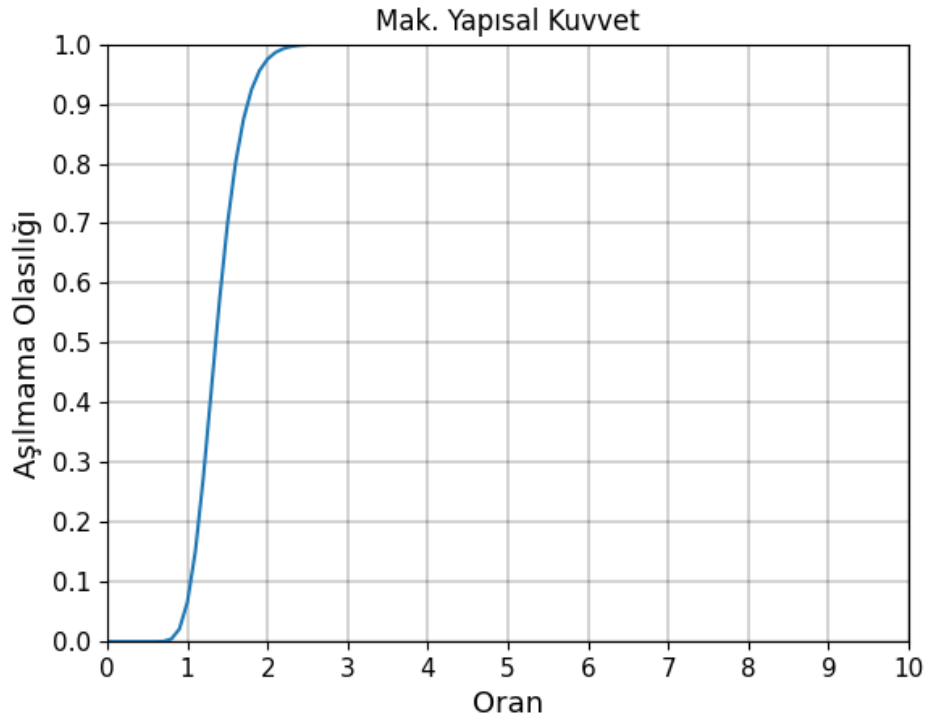
Tablo 4.1.İki sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı

<i>Tepki</i>	<i>Seri Adı</i>	<i>Aritmetik Ortalama</i>	<i>Seri içerisindeki eleman sayısı</i>
Maksimum Yapı Deplasmanı	Bütün	1.03	16239
	x>1	2.14	6483
Maksimum İzolatör Deplasmanı	Bütün	1.03	16294
	x>1	2.43	5902
Maksimum Yapı Kuvveti	Bütün	0.71	16332
	x>1	1.37	5316
Maksimum İzolatör Kuvveti	Bütün	0.88	16131
	x>1	1.2	5894

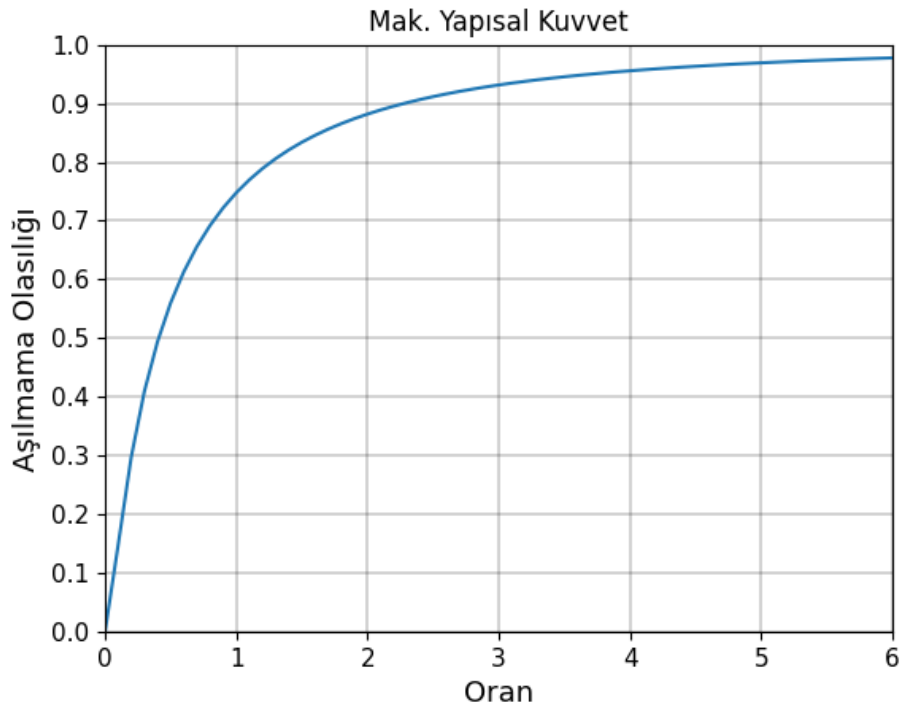
Tablo 4.1. (devamı) İki sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı

Maksimum Rölatif Deplasman	Bütün	0.79	16930
	x>1	1.47	5294
Kalıcı İzolatör Deplasmanı	Bütün	1.95	16631
	x>1	5.5	5649
Kalıcı Yapısal Deplasmanı	Bütün	2.19	16705
	x>1	5.4	6640
Kalıcı Yapısal Kuvvet	Bütün	2.56	1823
	x>1	5.78	920
Kalıcı İzolatör Kuvveti	Bütün	2.19	2544
	x>1	5.21	1208

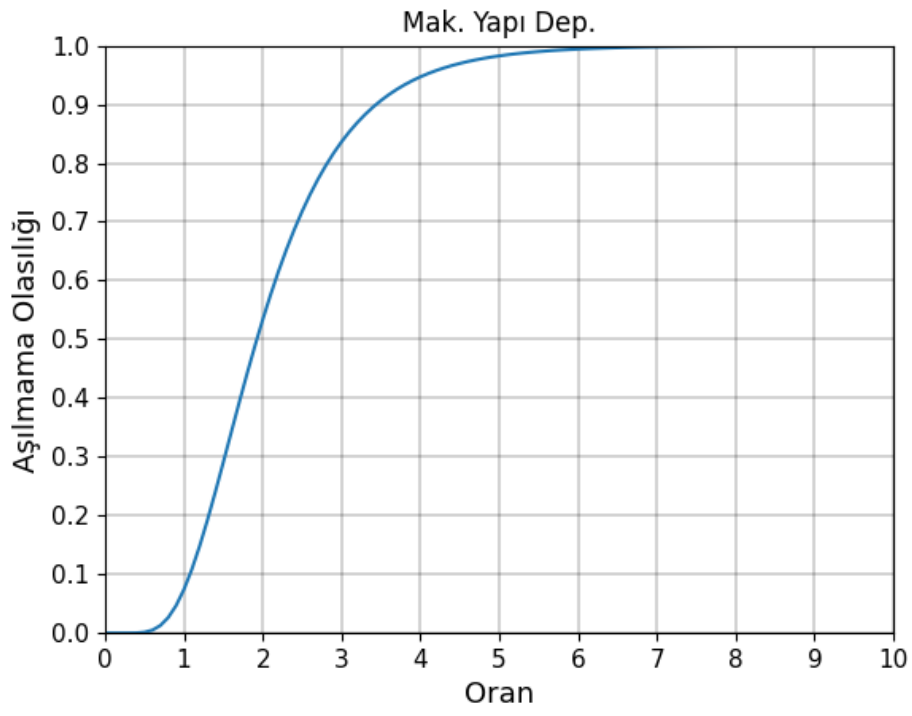
Elde edilen oranlara ait seri içerisindeki data sayısı birden büyük olan değerlerin kaç adet olarak seride yer aldığı sonuçların değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Buna ek olarak hem tüm seri için hem de sadece birden büyük değerlere ait kümülatif dağılım fonksiyonu grafikleri de ayrıca sunulmuştur. Bu grafiklerden oran değerlerinin kümülatif olarak nasıl dağıldığı ve farklı oranların seri içerisinde sahip oldukları aşılma olasılıkları kolay bir şekilde elde edilebilir. Kalıcı deplasman ve kuvvet gibi parametrelere ait oran değeri 4.5 gibi değerler alabilmektedir. Ancak burada dikkat etmek gerekir ki genellikle bu tepkiler maksimum değerlere oranla daha küçüktür. Örneğin kalıcı izolatör deplasmanı birkaç mm veya birkaç cm olabilmektedir. Dolayısıyla elde edilecek oran değeri ile bu değer çarpımı artçı şok depreminde meydana gelen tepkiyi vereceğinden buradan elde edilecek sonuç maksimum deplasman değerine göre nispeten küçük bir ölçekte kalacaktır. Şekil 4.1-4.18 elde edilen kümülatif dağılım fonksiyonlarının grafiğini göstermektedir.



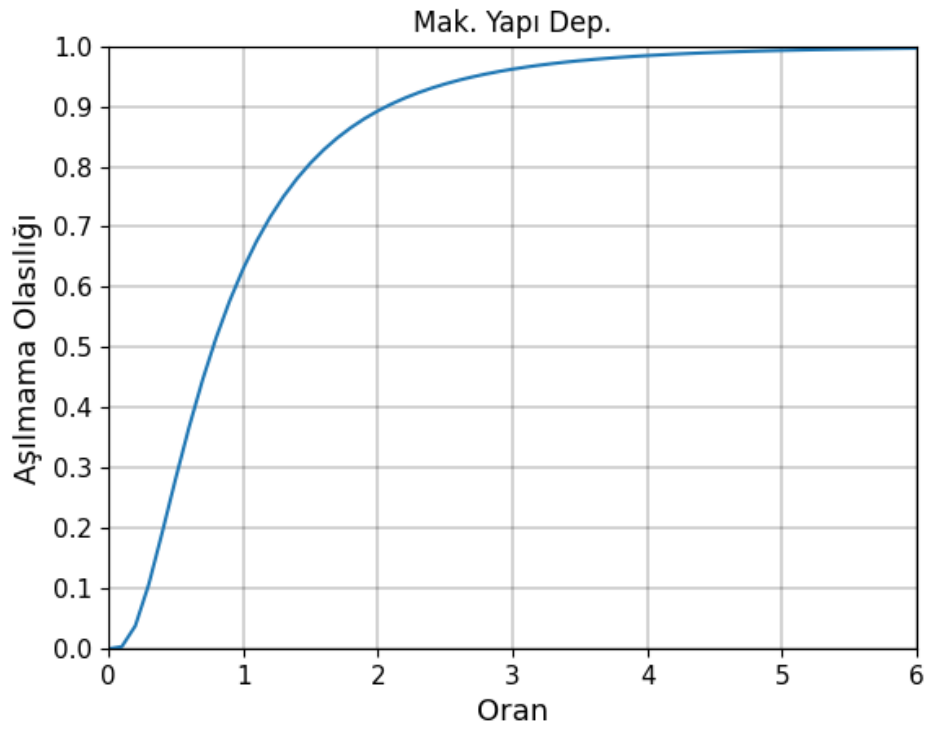
Şekil 4.1. Maksimum yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



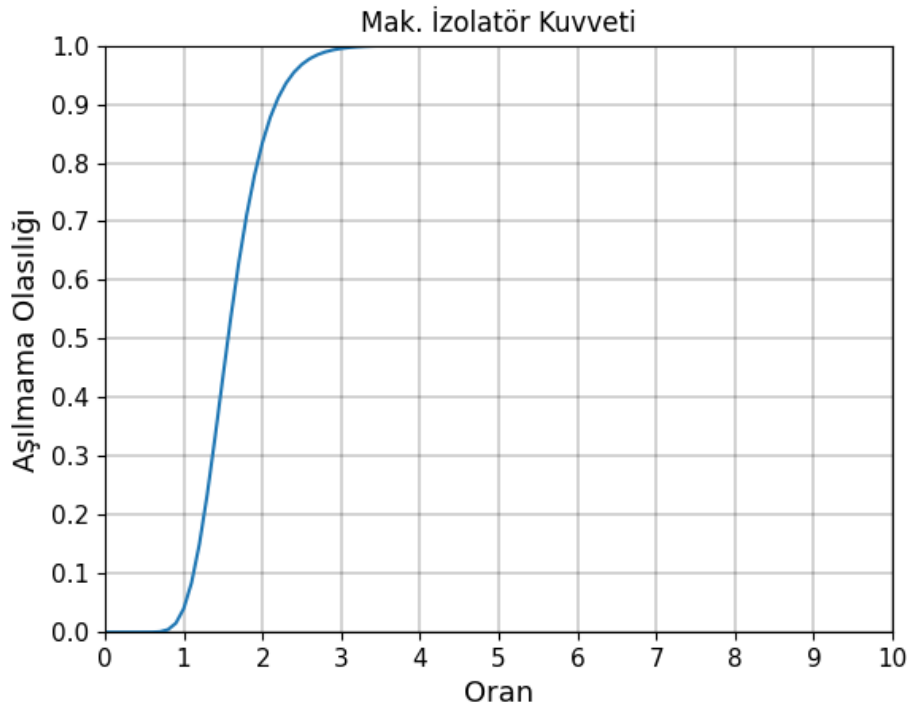
Şekil 4.2. Maksimum yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



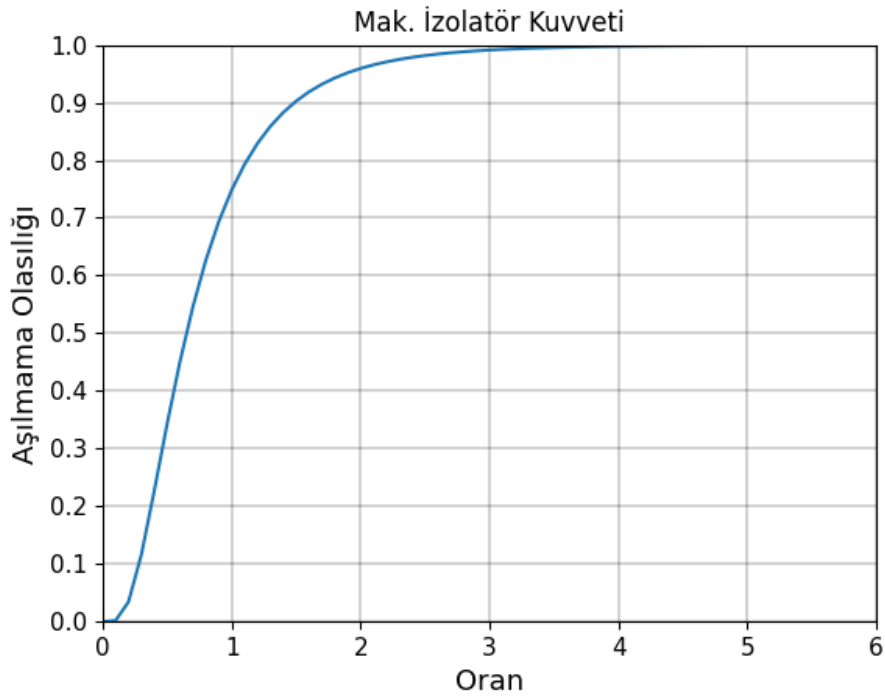
Şekil 4.3. Maksimum yapı deplasmanı için oranın 1’den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



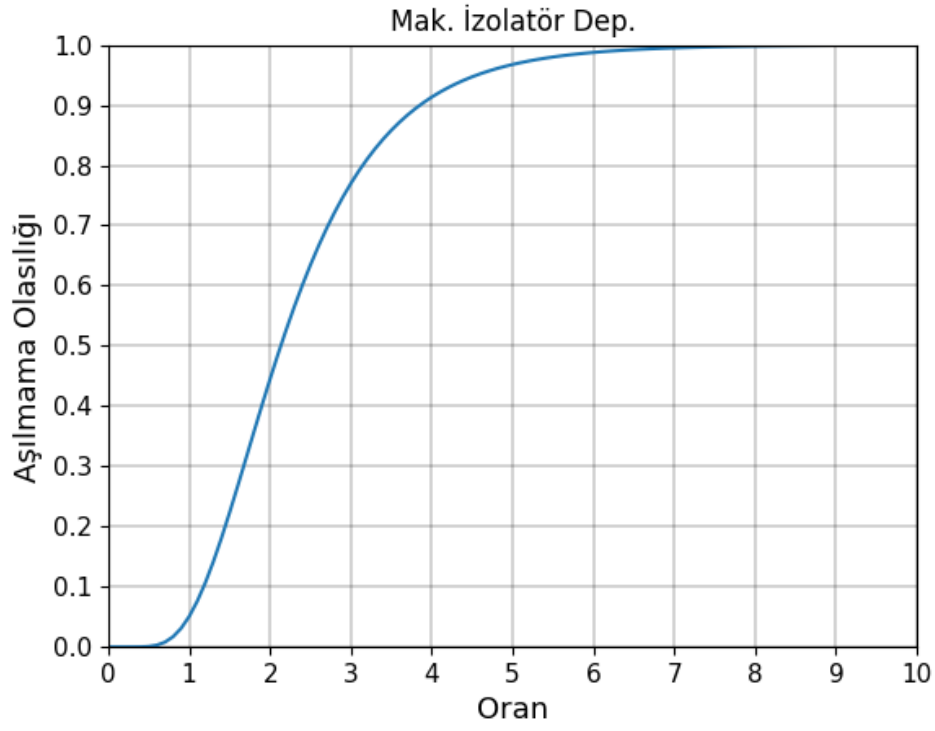
Şekil 4.4. Maksimum yapı deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



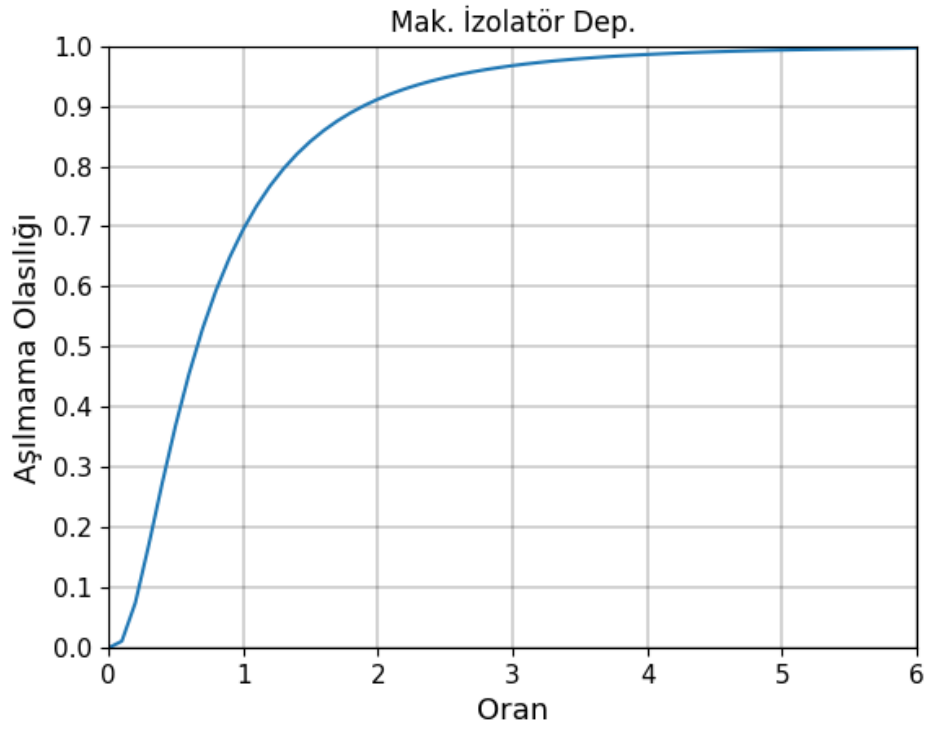
Şekil 4.5. Maksimum izolatör kuvveti için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



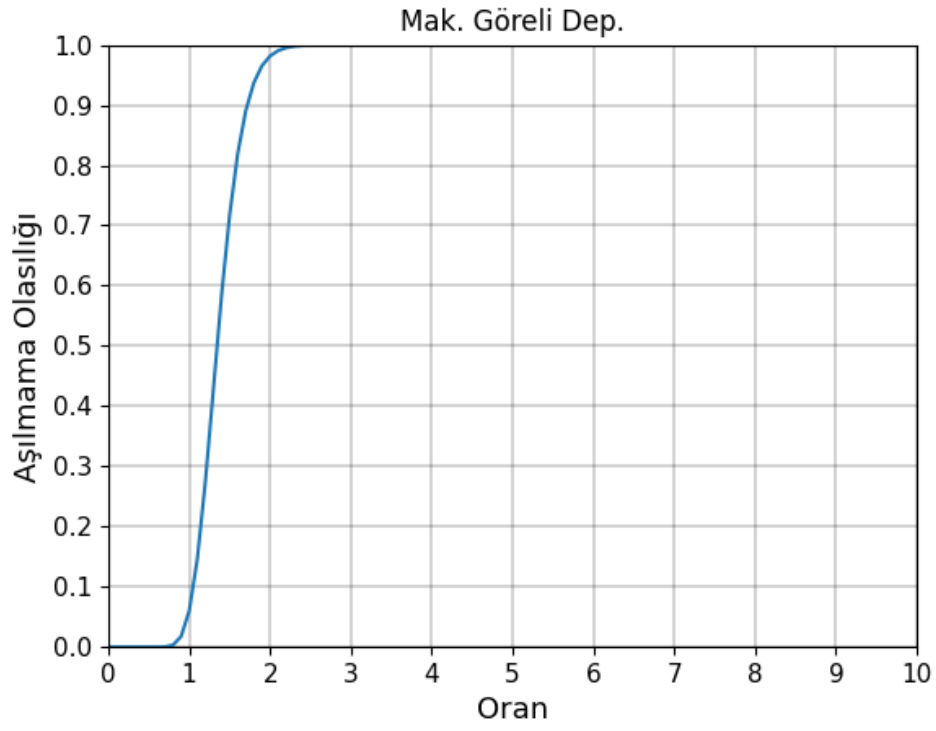
Şekil 4.6. Maksimum izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



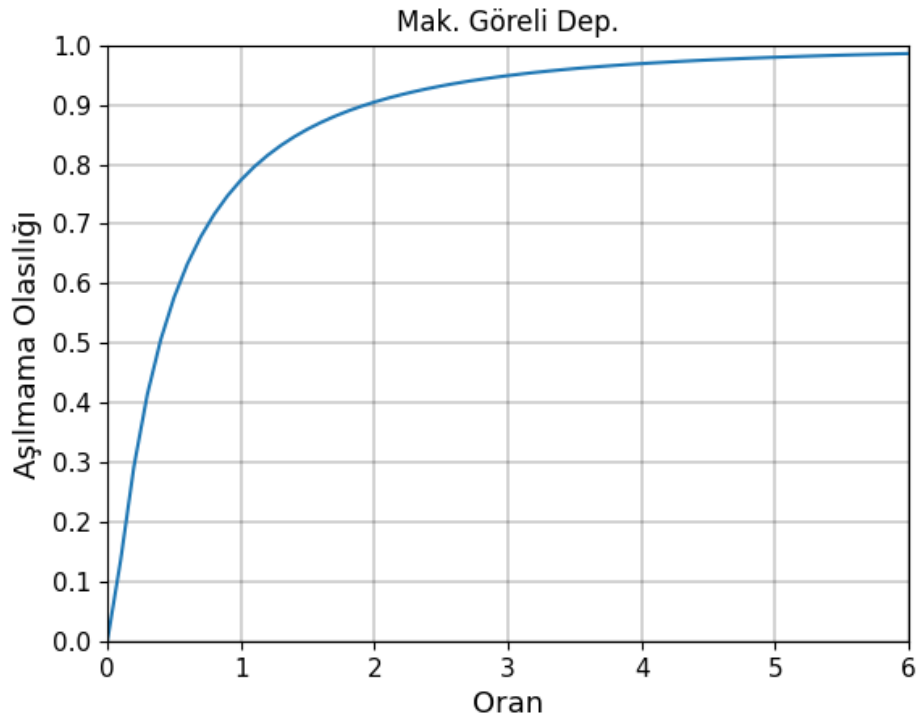
Şekil 4.7. Maksimum izolatör deplasmanı için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



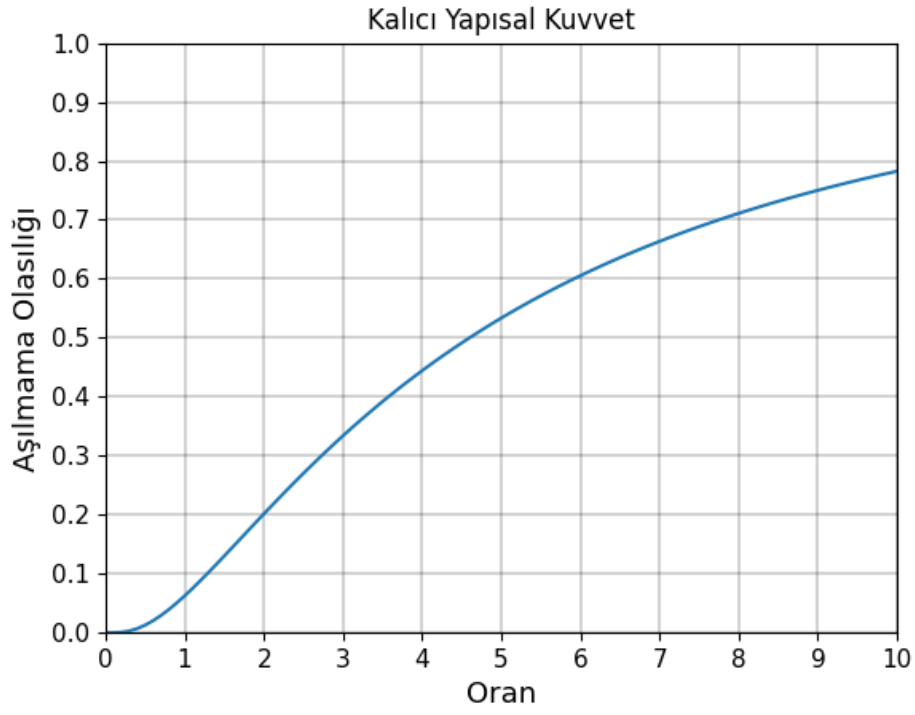
Şekil 4.8. Maksimum izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



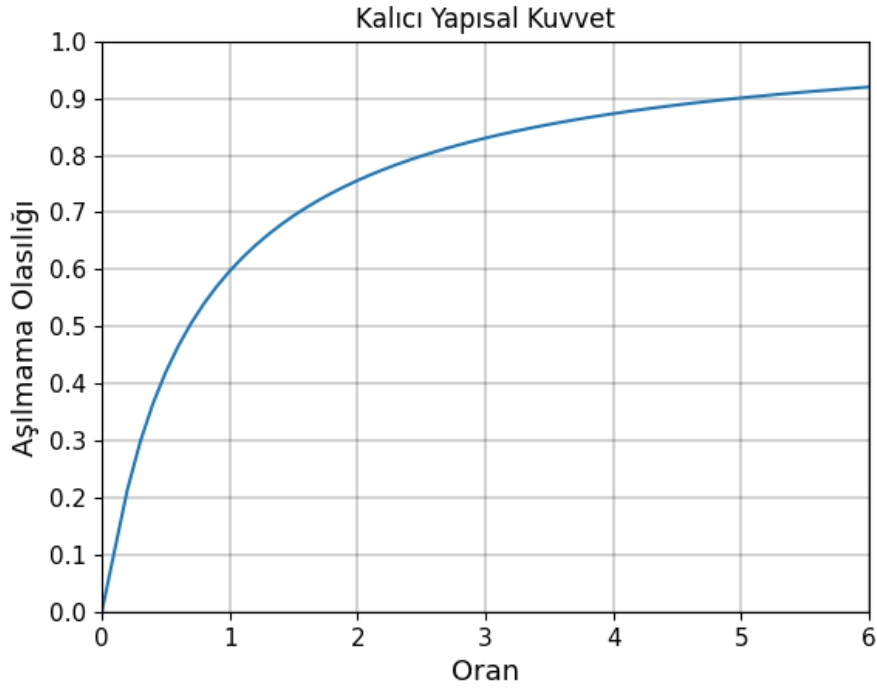
Şekil 4.9. Maksimum görelî deplasman oranının 1’den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



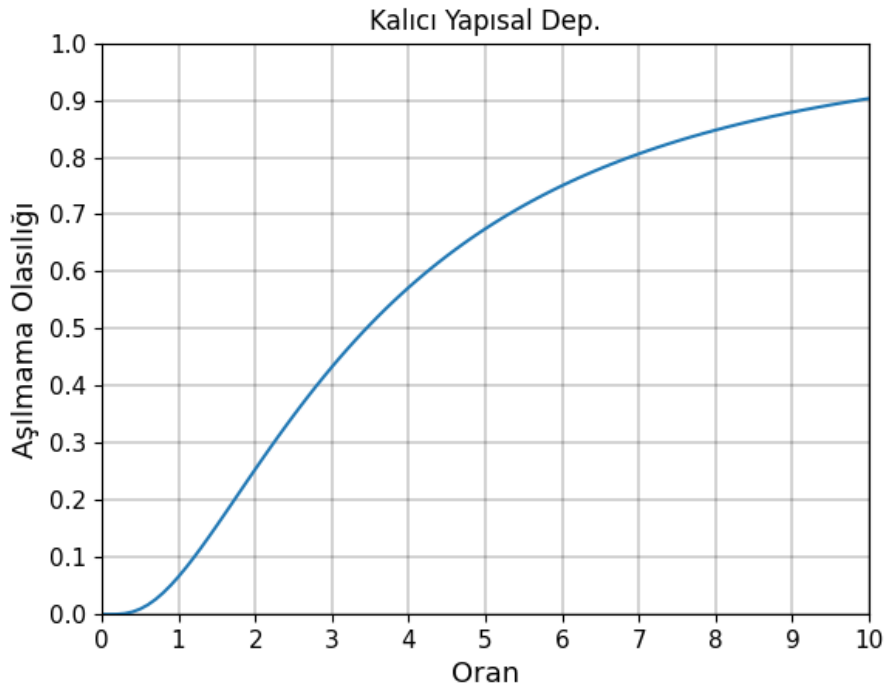
Şekil 4.10. Maksimum görelî deplasmanında bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



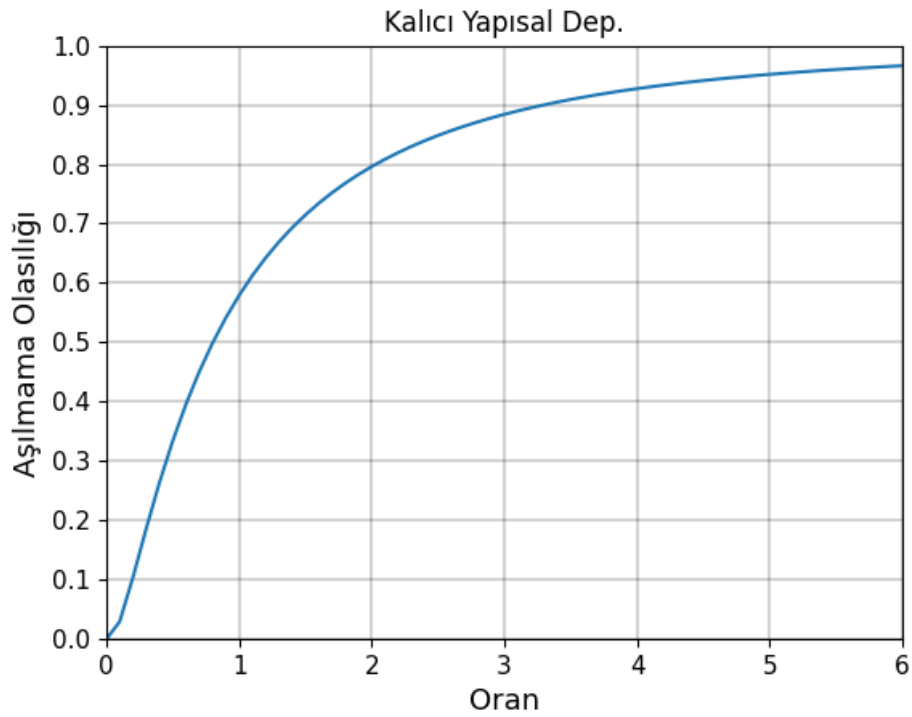
Şekil 4.11. Kalıcı yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



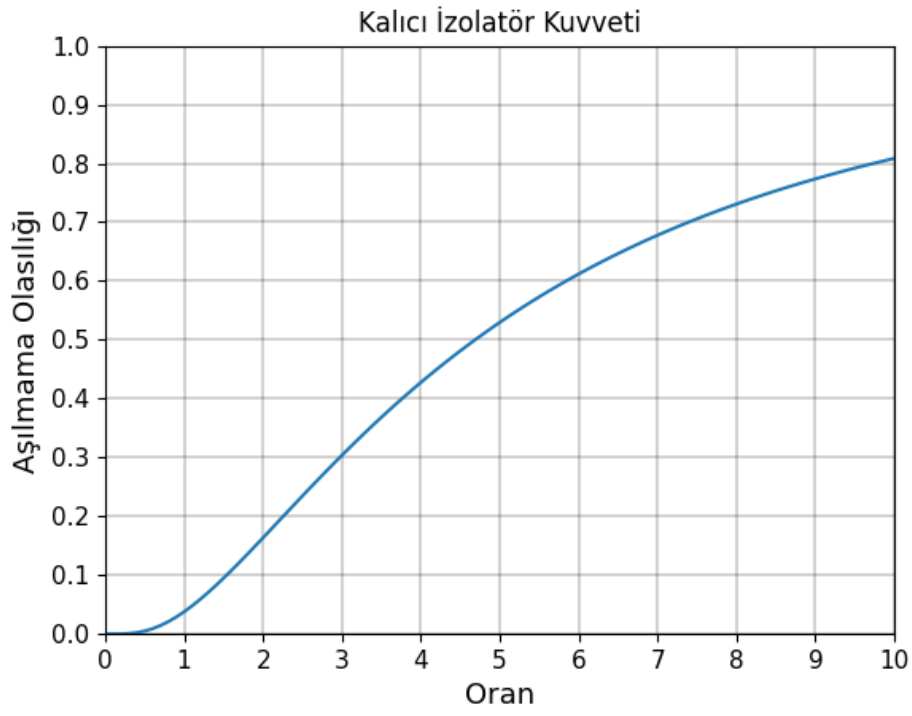
Şekil 4.12. Kalıcı yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



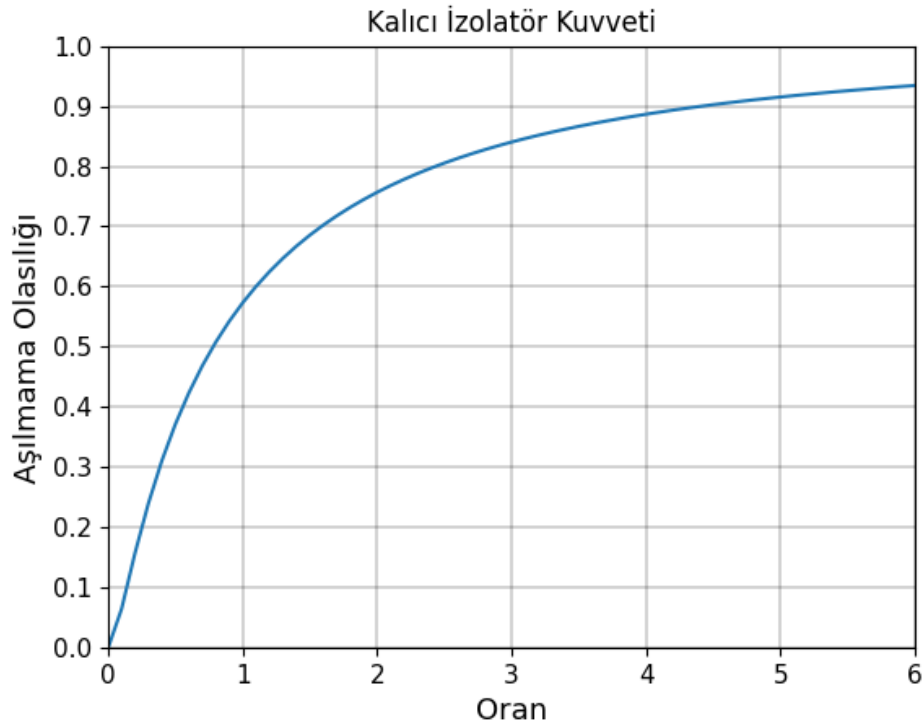
Şekil 4.13. Kalıcı yapısal deplasman oranının 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



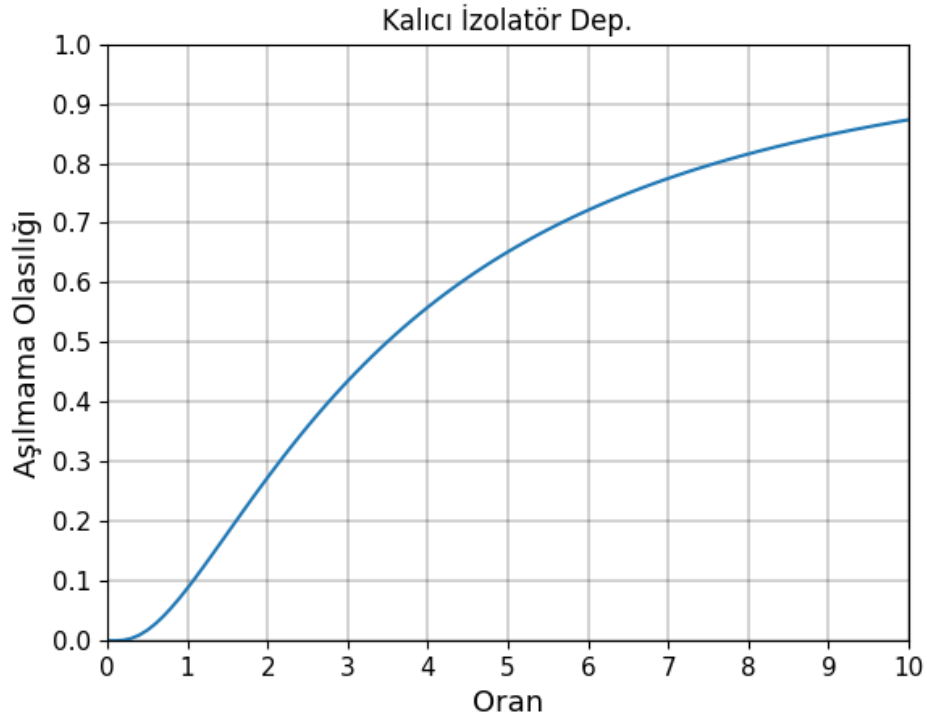
Şekil 4.14. Kalıcı yapısal deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



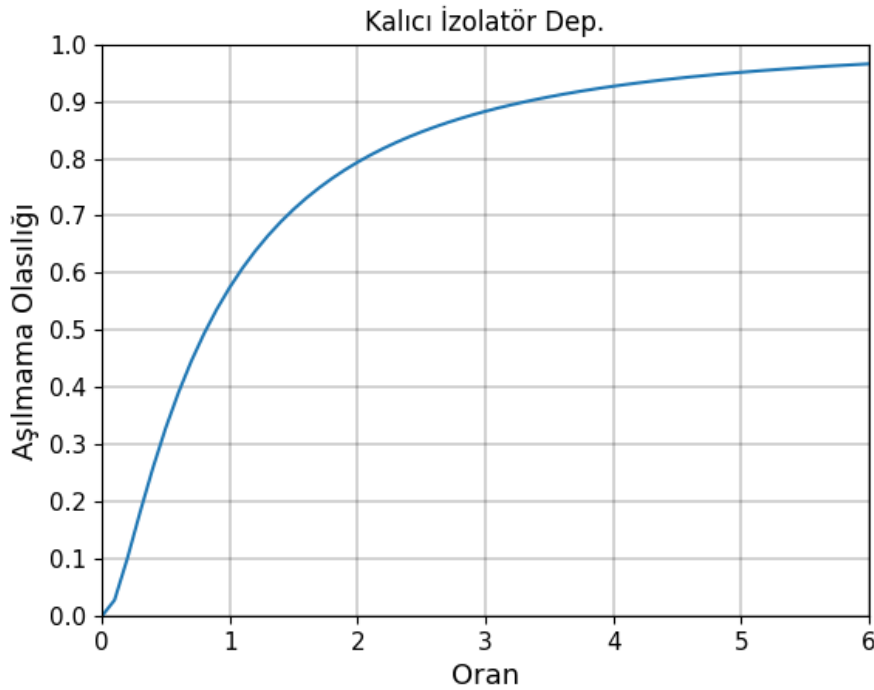
Şekil 4.15. Kalıcı izolatör kuvveti için oranın 1'den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



Şekil 4.16. Kalıcı izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)



Şekil 4.17. Kalıcı izolatör deplasman oranının 1’den büyük olması durumu (iki yüzeyli)



Şekil 4.18. Kalıcı izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (iki yüzeyli)

Ayrıca iki yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemleri için elde edilen tepki parametrelerinin oranı üç sürtünme yüzeyli sistemler için de hesaplanmıştır ve hesaplanan değerler Tablo 4.2’de

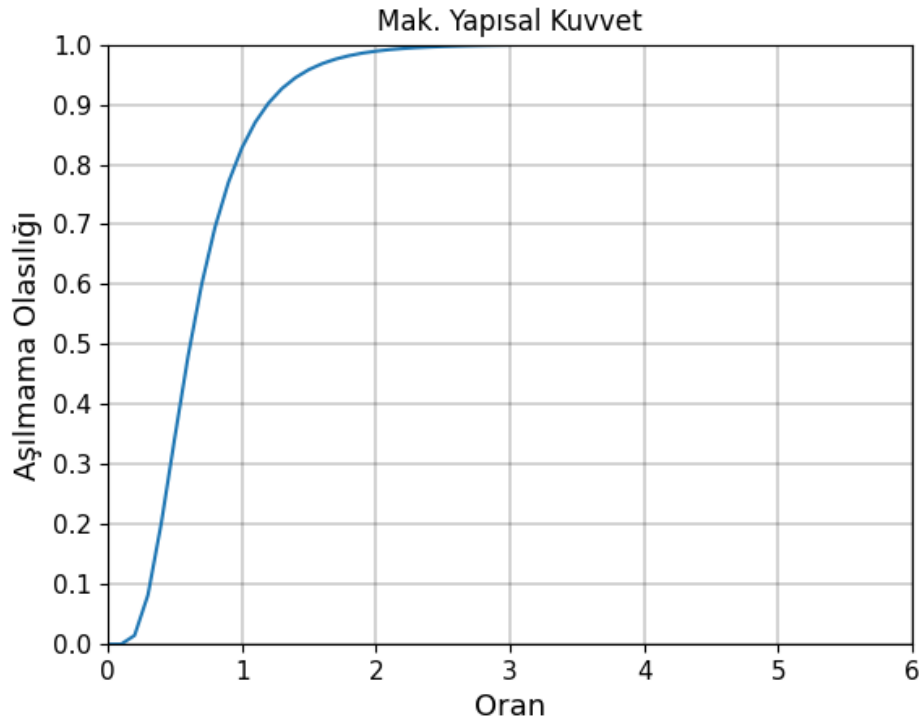
verilmiştir. Maksimum yapı deplasman değeri tüm seri içerisinde yer alan değerler dikkate alındığında 1.02 olmaktadır ve bu değer %2'lik bir artışa karşılık gelmektedir. Maksimum izolatör deplasman değeri ise tüm seri içerisindeki değerler dikkate alındığında yaklaşık olarak artçı şok etkisinin %6 değerinde bir artışa neden olduğu görülmektedir. Maksimum yapı kuvveti tüm seri için incelendiğinde artçı depremler artışa neden olmamıştır ve sadece birden büyük değerler irdelendiğinde oranın 1,67 olduğu görülmektedir. Bu tepki için birden büyük olan değerlerin adedi 7500 civarındadır ve tüm seri elemanlarında değerlendirmeye tabi tutulan değer sayısının yaklaşık olarak %30'udur. Maksimum izolatör kuvvetinde ise tüm serinin ortalaması bir değerine yakındır. Ancak sadece birden büyük elemanlar dikkate alındığında tepki oranı değeri 1.47'dir ve birden büyük değerlerin adedi tüm seri için dikkate alınan değerlerin adedinin yaklaşık olarak %30'u civarındadır. Benzer durum maksimum rölatif deplasman değeri için de geçerlidir. Kalıcı izolatör ve yapı deplasman ve kuvvet değerleri incelendiğinde iki yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemi ile izole edilen modellere benzer davranış gözlenmiştir. Bu değerler artçı deprem etkisi altında belirgin bir oranda artış göstermiştir. Her bir tepki parametresine ait olarak ortalama değerler aşağıda yer alan Tablo 4.2'de verilmiştir. Ayrıca her bir parametreye ait kümülatif dağılım fonksiyonlarının grafikleri Şekil 4.19-4.36'da verilmiştir.

Tablo 4.2. Üç sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı

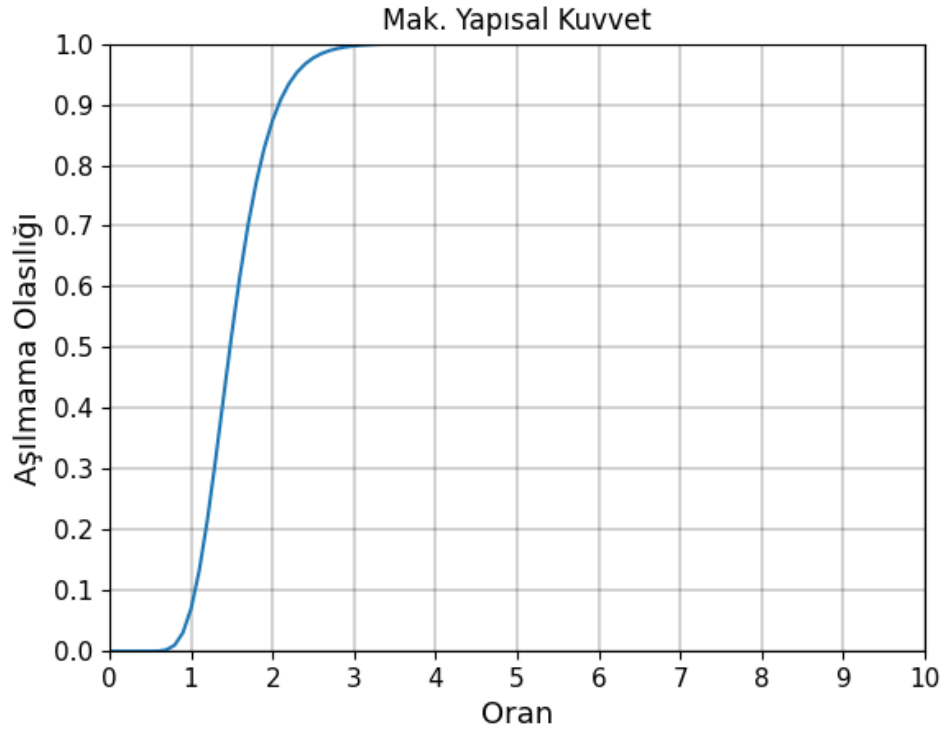
<i>Tepki</i>	<i>Seri Adı</i>	<i>Aritmetik Ortalama</i>	<i>Seri içerisindeki eleman sayısı</i>
<i>Maksimum Yapı Deplasmanı</i>	<i>Bütün</i>	<i>1.02</i>	<i>24993</i>
	<i>$x>1$</i>	<i>2.09</i>	<i>10128</i>
Maksimum İzolatör Deplasmanı	Bütün	1.06	25070
	$x>1$	2.3	10044
<i>Maksimum Yapı Kuvveti</i>	<i>Bütün</i>	<i>0.81</i>	<i>25096</i>
	<i>$x>1$</i>	<i>1.67</i>	<i>7567</i>

Tablo 4.2. (devamı) Üç sürtünme yüzeyli sistemlerden elde edilen tepki oranı

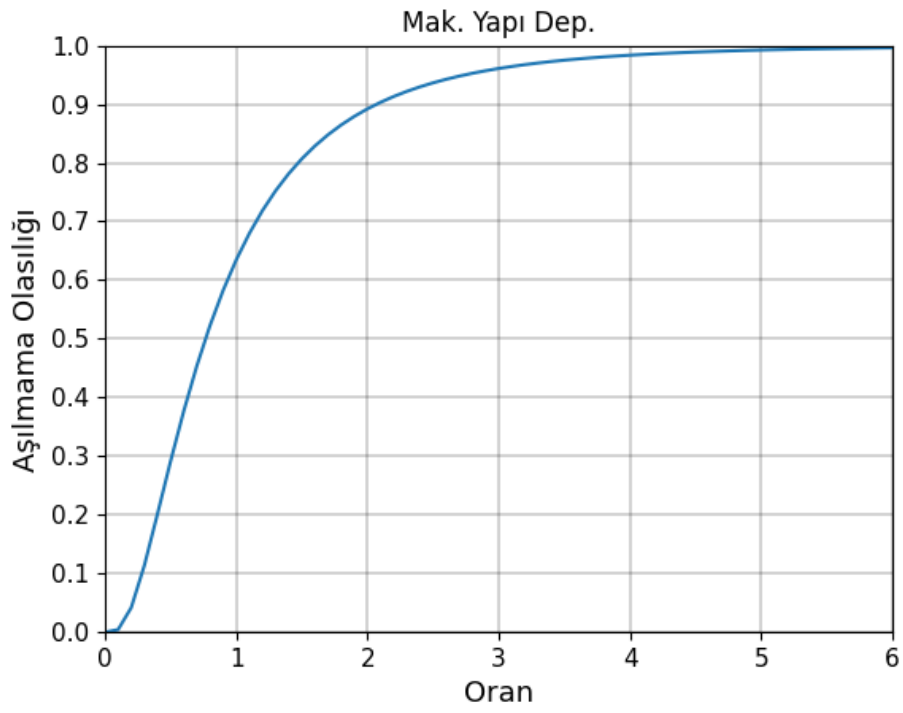
Maksimum İzolatör Kuvveti	Bütün	0.92	25020
	$x>1$	1.47	9724
<i>Maksimum Rölatif Deplasman</i>	<i>Bütün</i>	<i>0.82</i>	<i>25123</i>
	<i>$x>1$</i>	<i>1.67</i>	<i>7618</i>
Kalıcı İzolatör Deplasmanı	Bütün	2.16	25120
	$x>1$	4.35	12556
<i>Kalıcı Yapısal Deplasmanı</i>	<i>Bütün</i>	<i>2.15</i>	<i>25191</i>
	<i>$x>1$</i>	<i>4.6</i>	<i>12188</i>
Kalıcı Yapısal Kuvvet	Bütün	1.59	6201
	$x>1$	2.96	3244
<i>Kalıcı İzolatör Kuvveti</i>	<i>Bütün</i>	<i>1.35</i>	<i>7521</i>
	<i>$x>1$</i>	<i>2.71</i>	<i>3520</i>



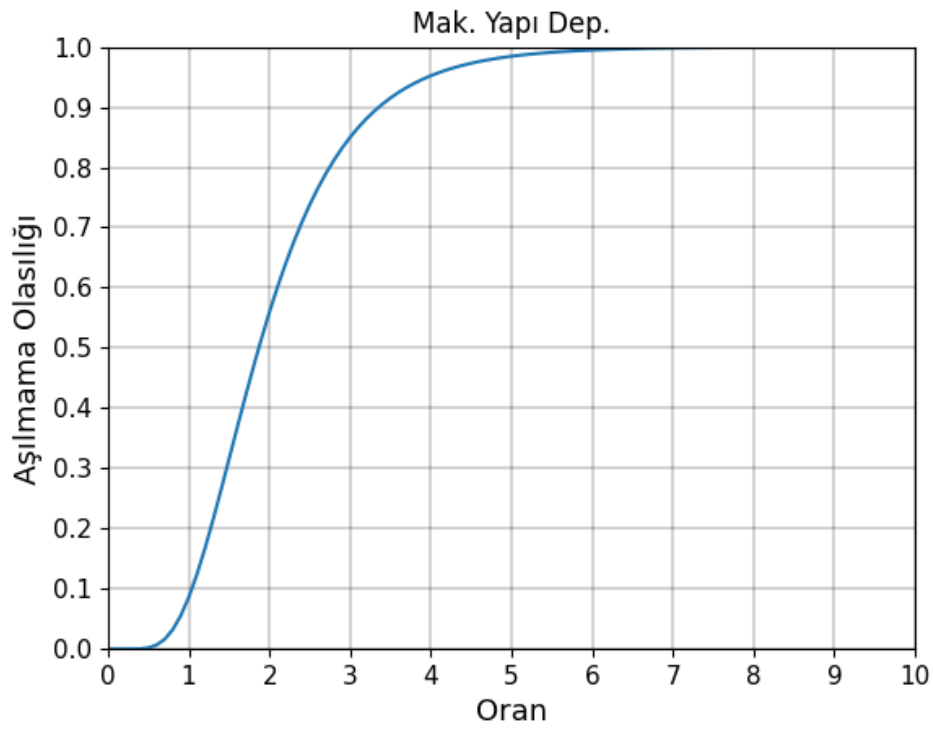
Şekil 4.19. .Maksimum yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyle)



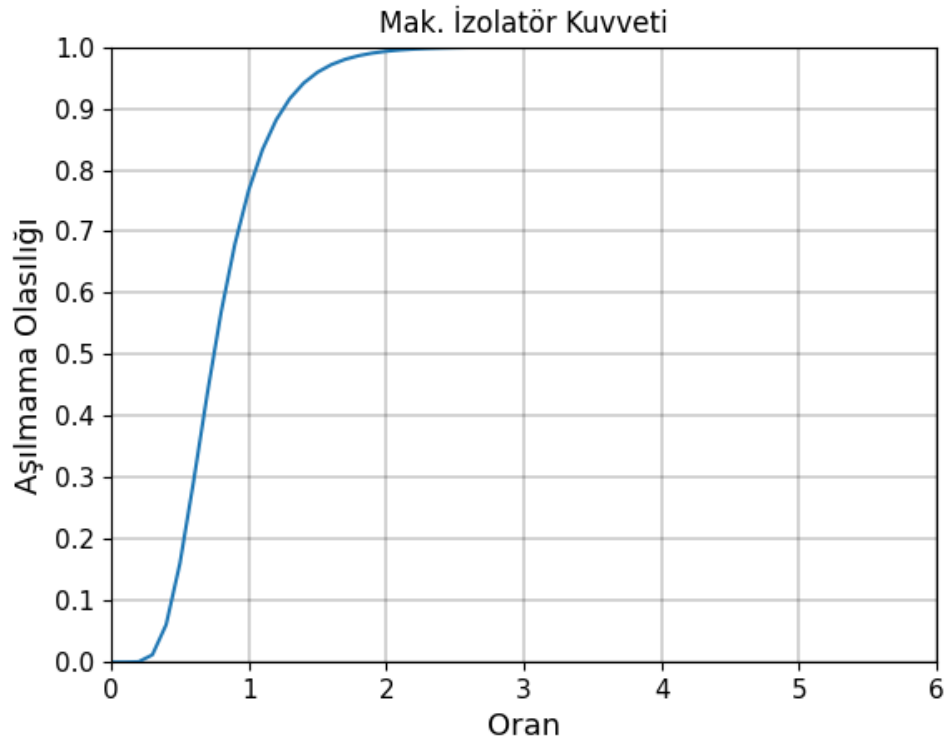
Şekil 4.20. Maksimum yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (üç yüzeyle için)



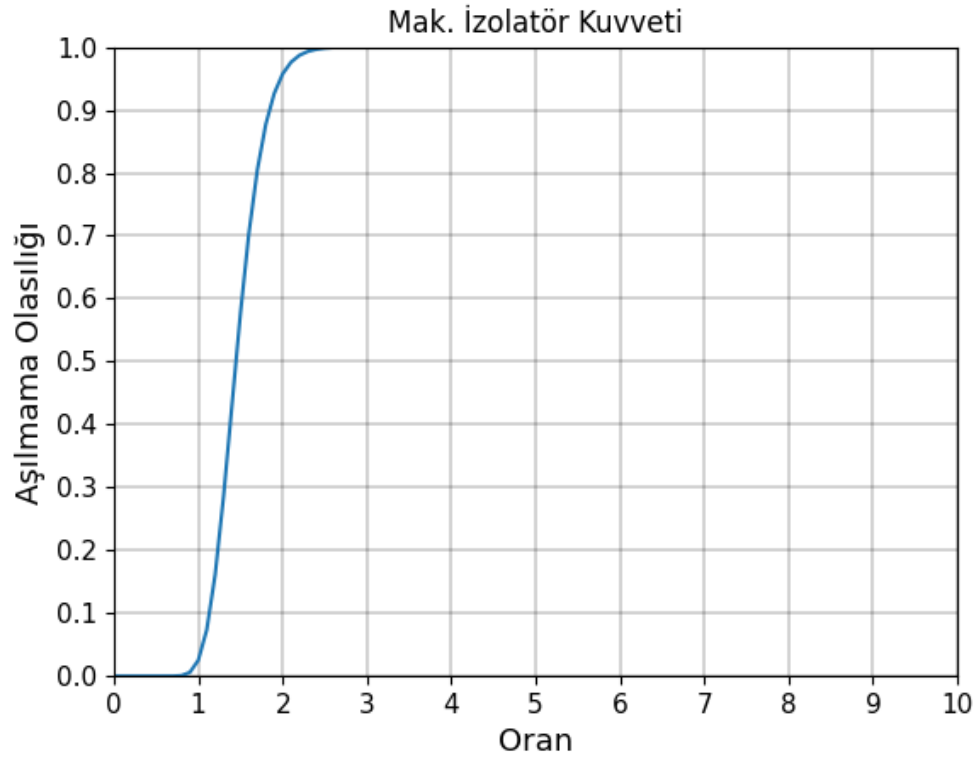
Şekil 4.21. Maksimum yapı deplasman oranının 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



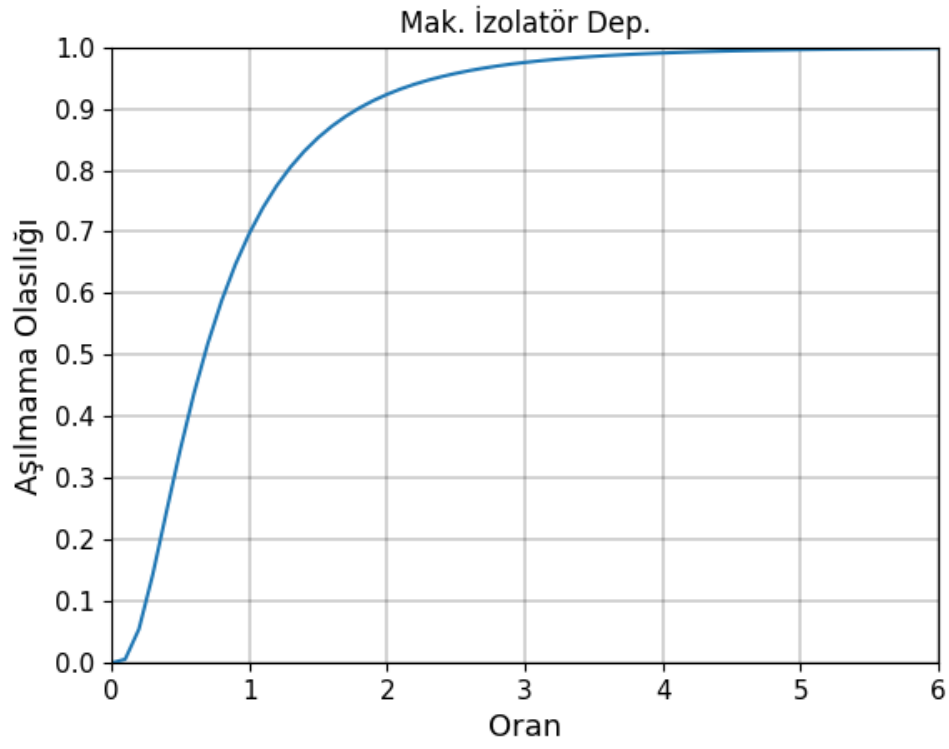
Şekil 4.22. Maksimum yapı deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



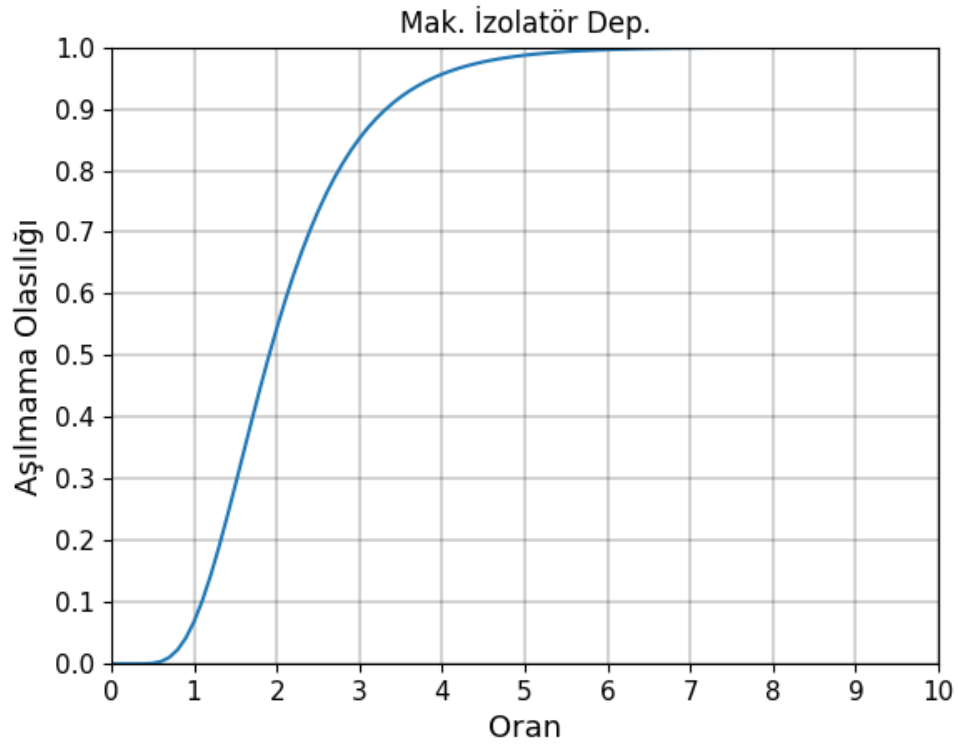
Şekil 4.23. Maksimum izolatör kuvveti için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



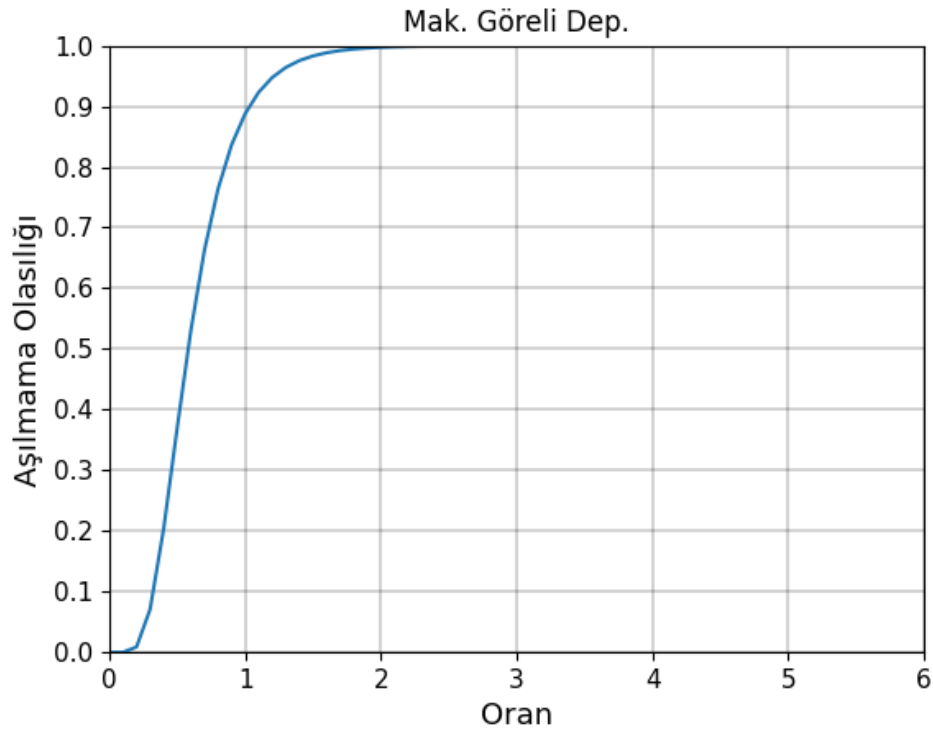
Şekil 4.24. Maksimum izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



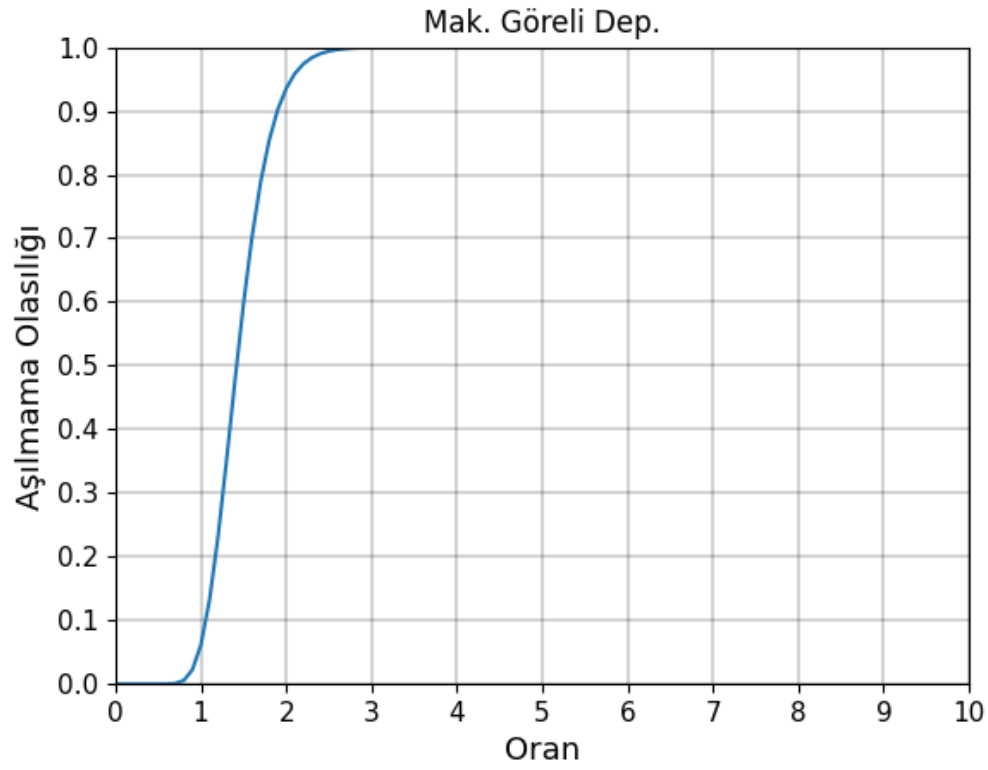
Şekil 4.25. Maksimum izolatör deplasmanı için oranın 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



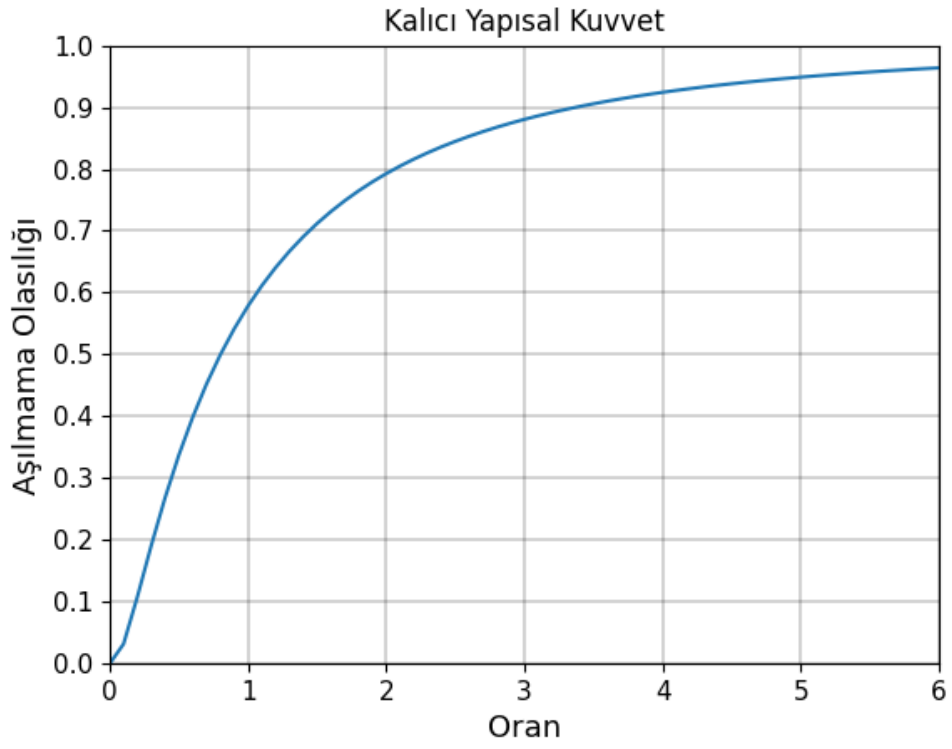
Şekil 4.26. Maksimum izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



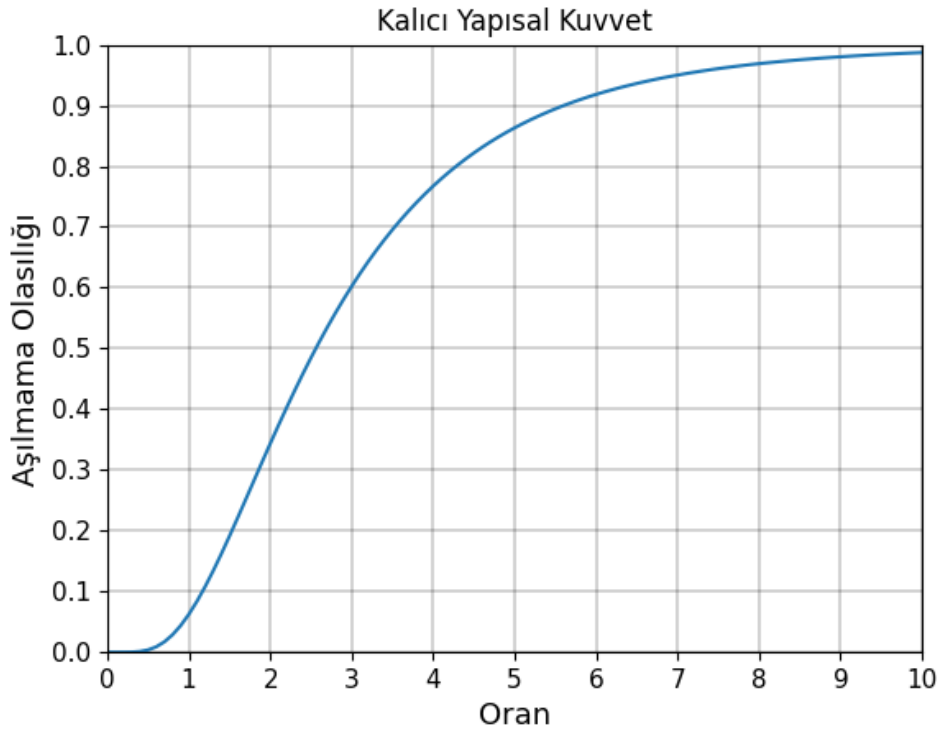
Şekil 4.27. Maksimum görelî deplasman oranının 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



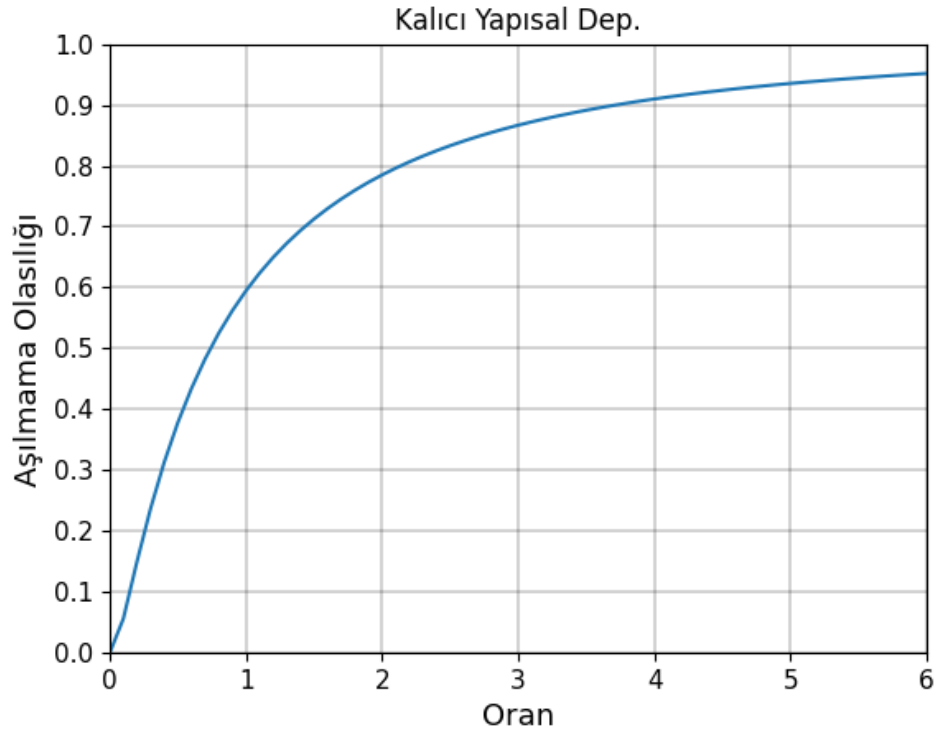
Şekil 4.28. Maksimum görelî deplasmanda bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



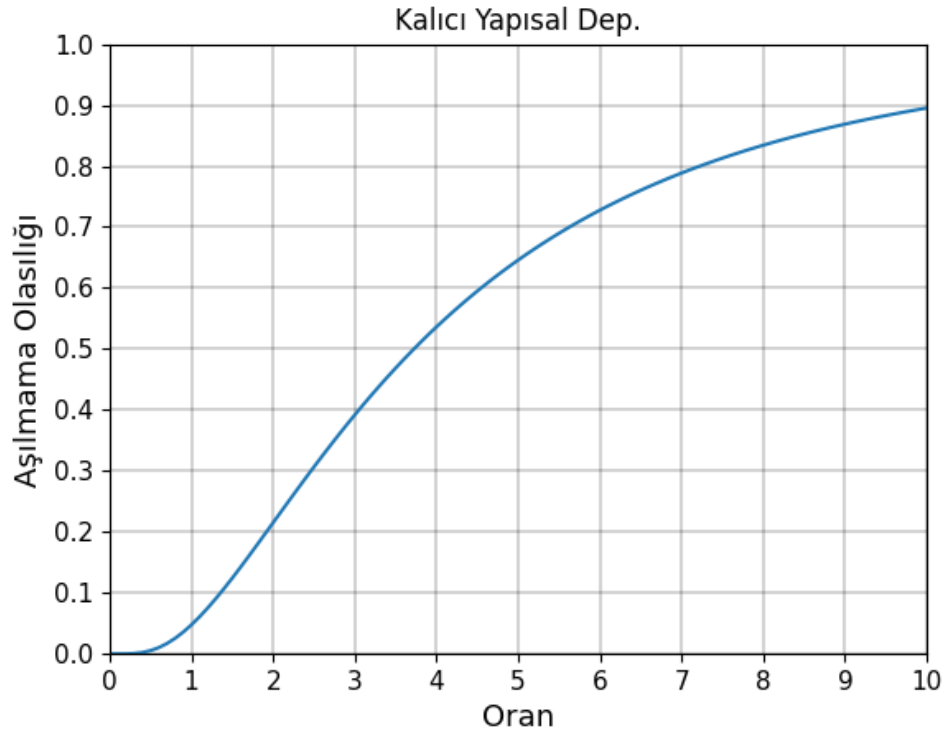
Şekil 4.29. Kalıcı yapısal kuvvet için oranın 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



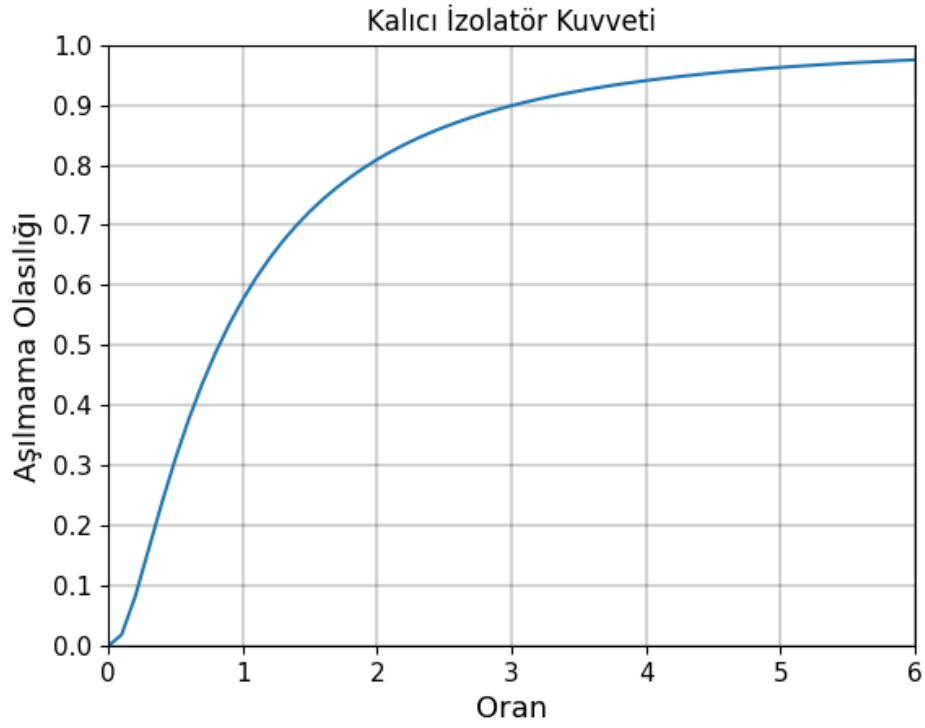
Şekil 4.30. Kalıcı yapısal kuvvet için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



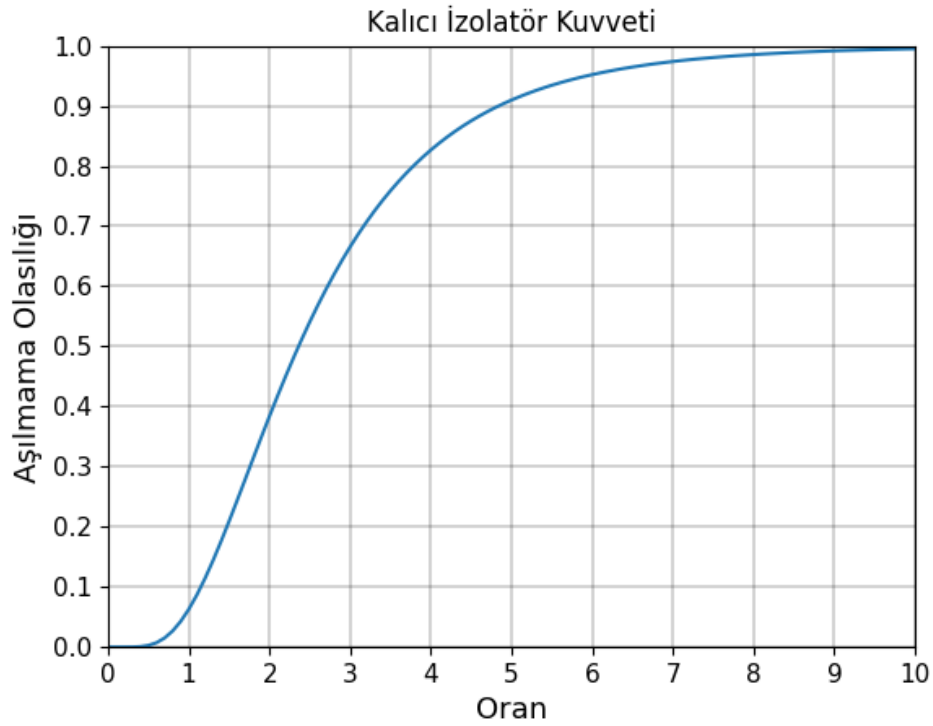
Şekil 4.31. Kalıcı yapısal deplasmanın oranının 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



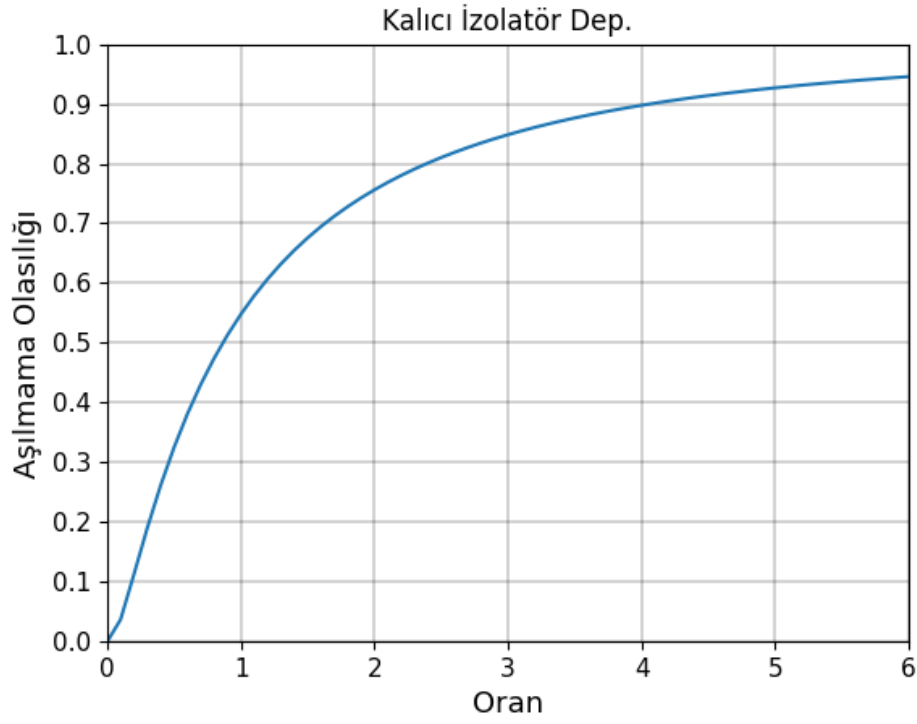
Şekil 4.32. Kalıcı yapısal deplasman için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)



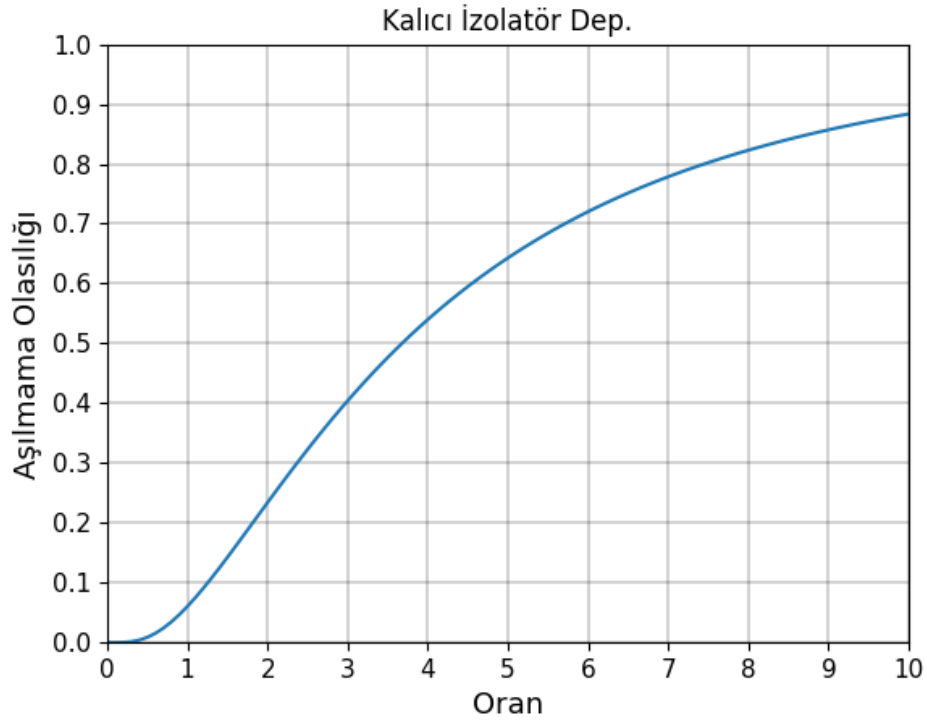
Şekil 4.33. Kalıcı izolatör kuvveti için oranın 1'den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)



Şekil 4.34. Kalıcı izolatör kuvveti için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)

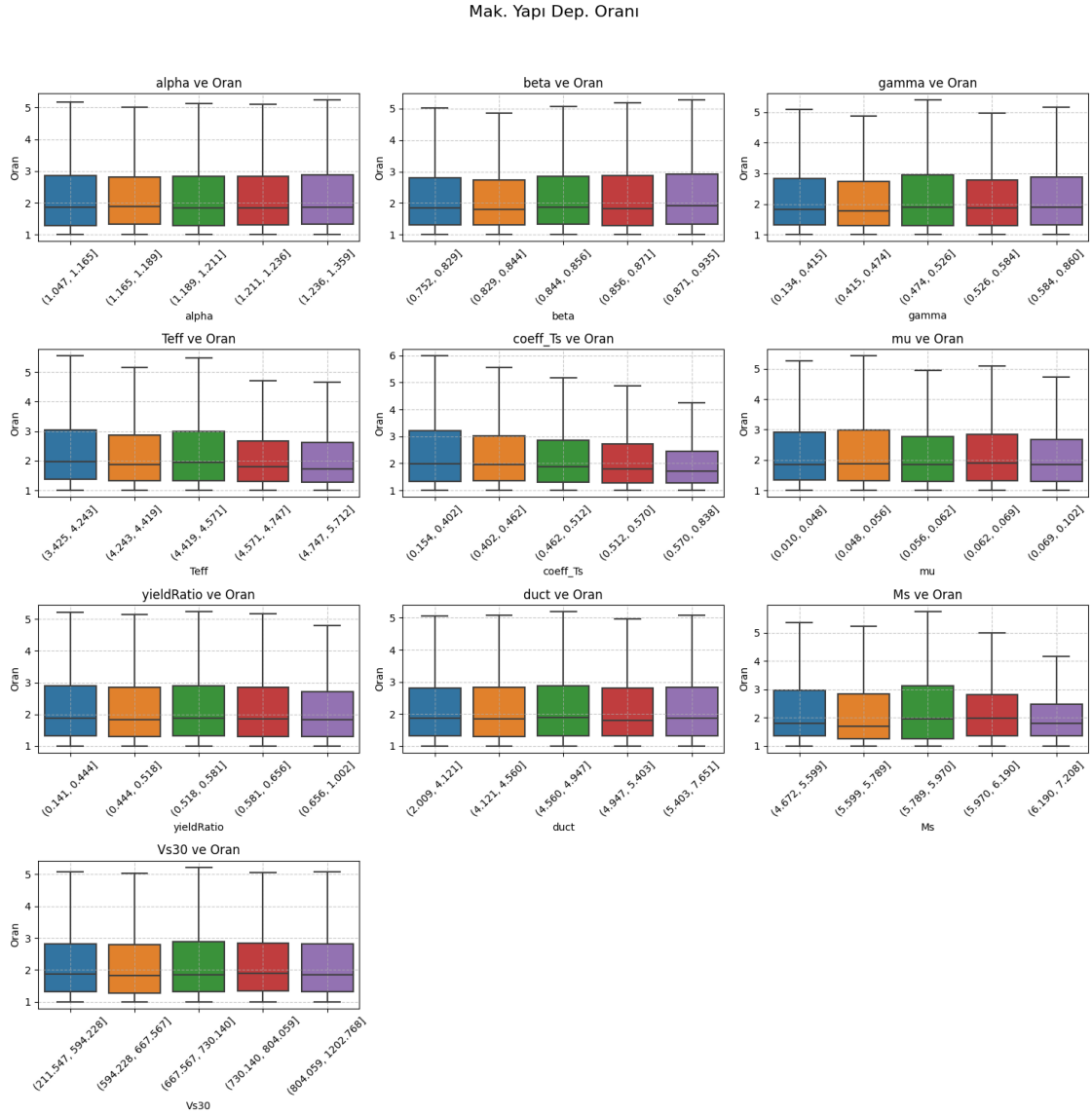


Şekil 4.35. Kalıcı izolatör deplasmanı için oranın 1’den büyük olması durumu (üç yüzeyli için)

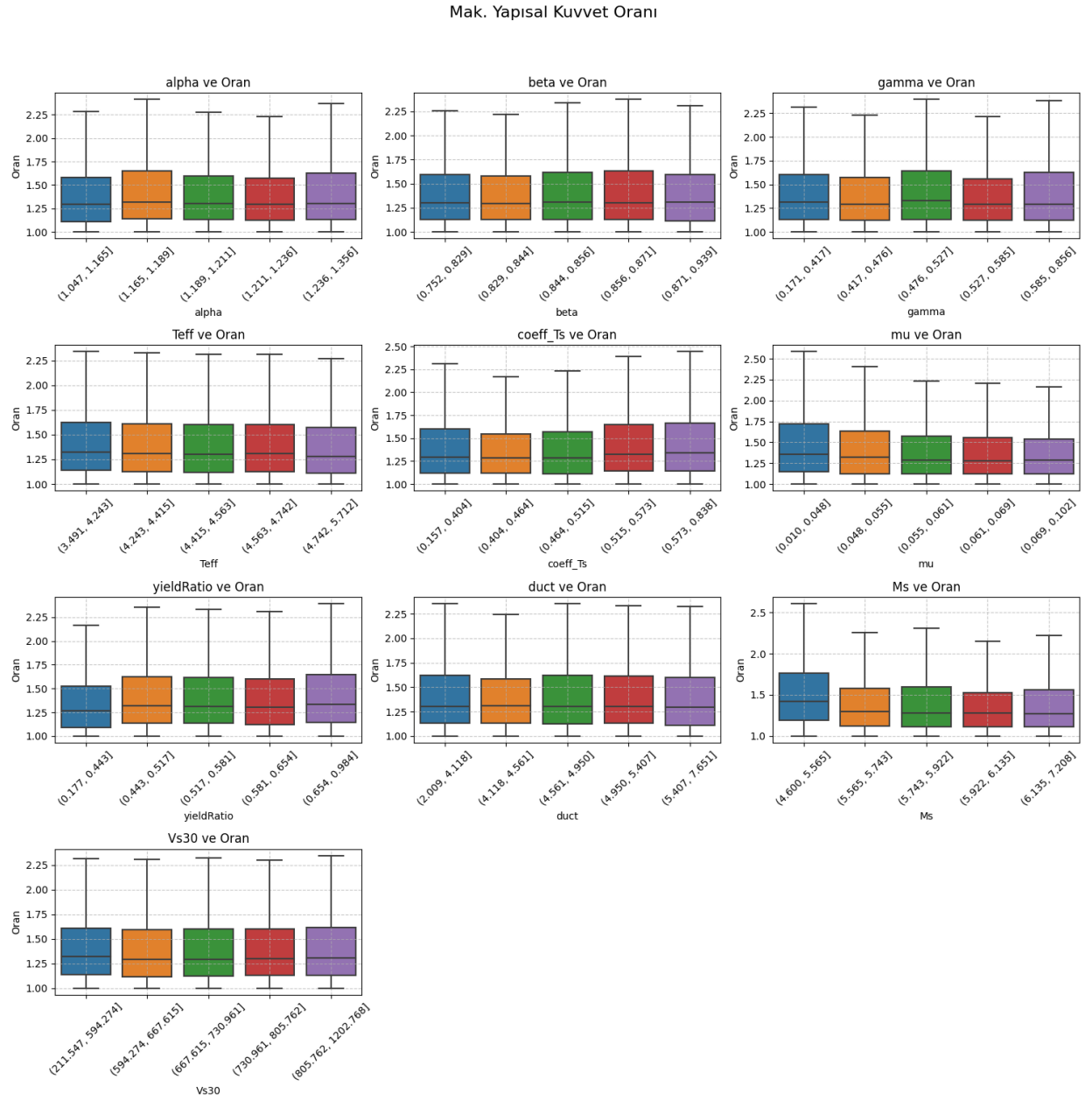


Şekil 4.36. Kalıcı izolatör deplasmanı için bütün oranların durumu (üç yüzeyli için)

Elde edilen kümülatif dağılım değerlerine ek olarak hangi tepkinin hangi girdi parametresine bağlı olarak ne şekilde değiştiğinin araştırılması amacıyla kutu grafikleri elde edilmiştir. Bu kutu grafikleri sadece birden büyük olan değerlerin dikkate alındığı seriler için oluşturulmuştur. Burada amaç artçı şok depreminin etki etmesi durumunda artış gösteren herhangi bir tepkide meydana gelen değişimin girdi parametrelerine bağlılığının irdelenmesidir. Aşağıda yer alan kutu grafikleri herhangi bir tasarım sırasında oran değerine karar vermede yardımcı olması amacıyla sunulmuştur. Şekil 4.37-4.41 iki yüzeyli sürtünmeli sistemlerde farklı yapısal tepkiler için verilen kutu grafiklerini göstermektedir. Verilen grafikler incelendiğinde değişen gamma, periyot katsayısı, sürtünme katsayısı, ana şokun magnitüd değeri gibi parametrelerin verilen oran değerlerinde diğerlerine göre belirgin ve değişken etkisi olduğu gözlenmiştir.

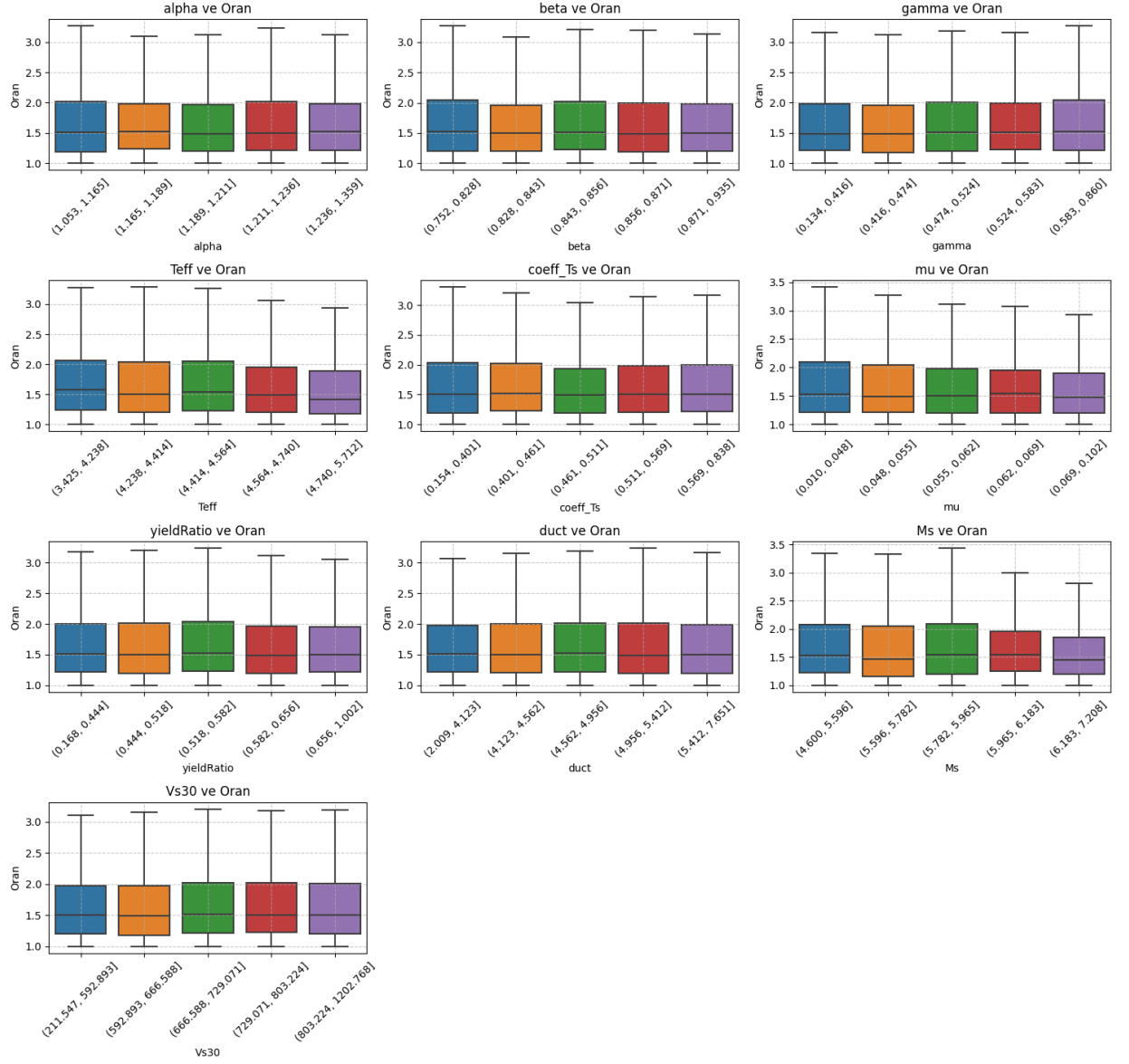


Şekil 4.37. Maksimum yapı deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)



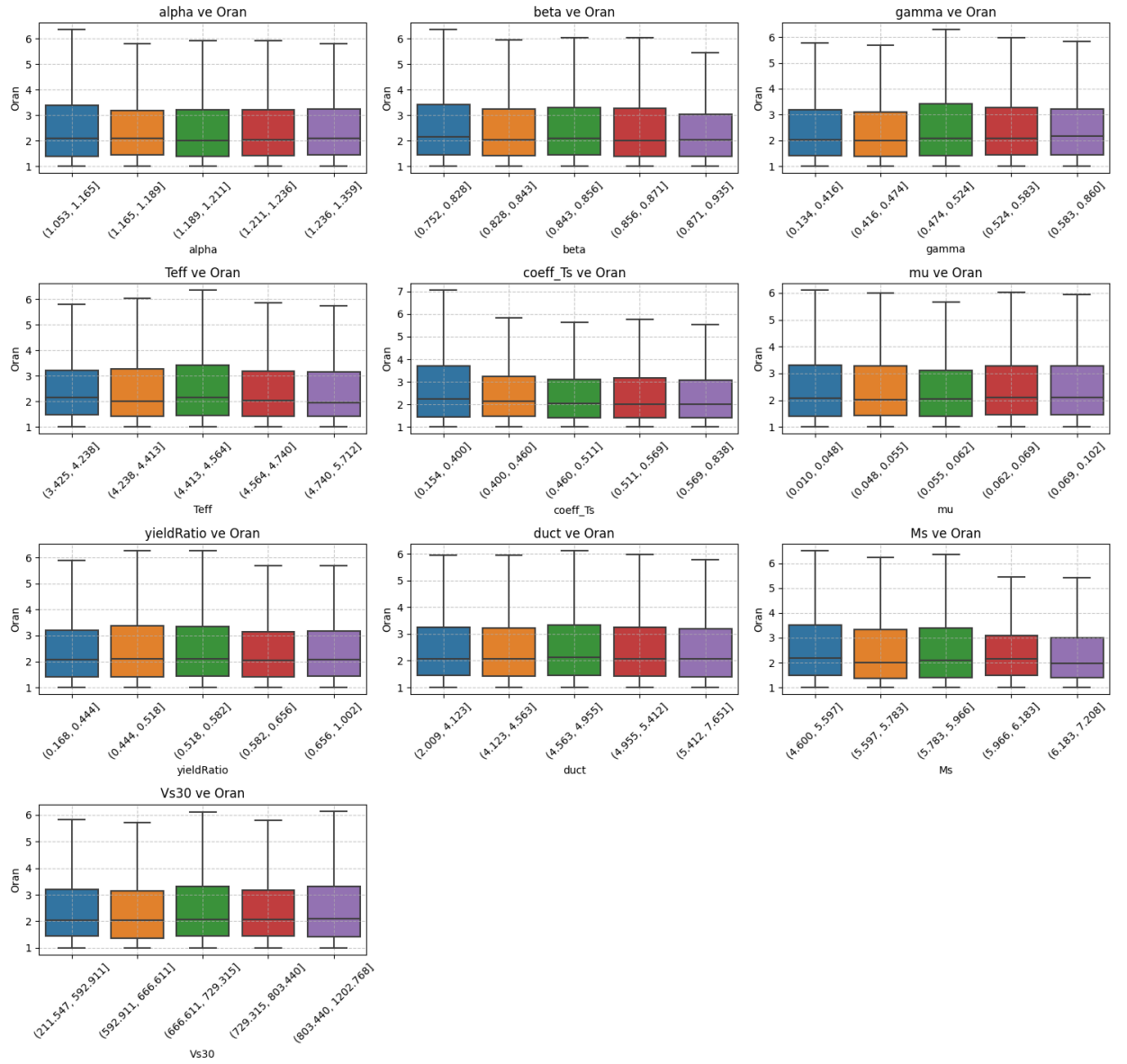
Şekil 4.38. Maksimum yapısal kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)

Mak. İzolatör Kuvveti Oranı



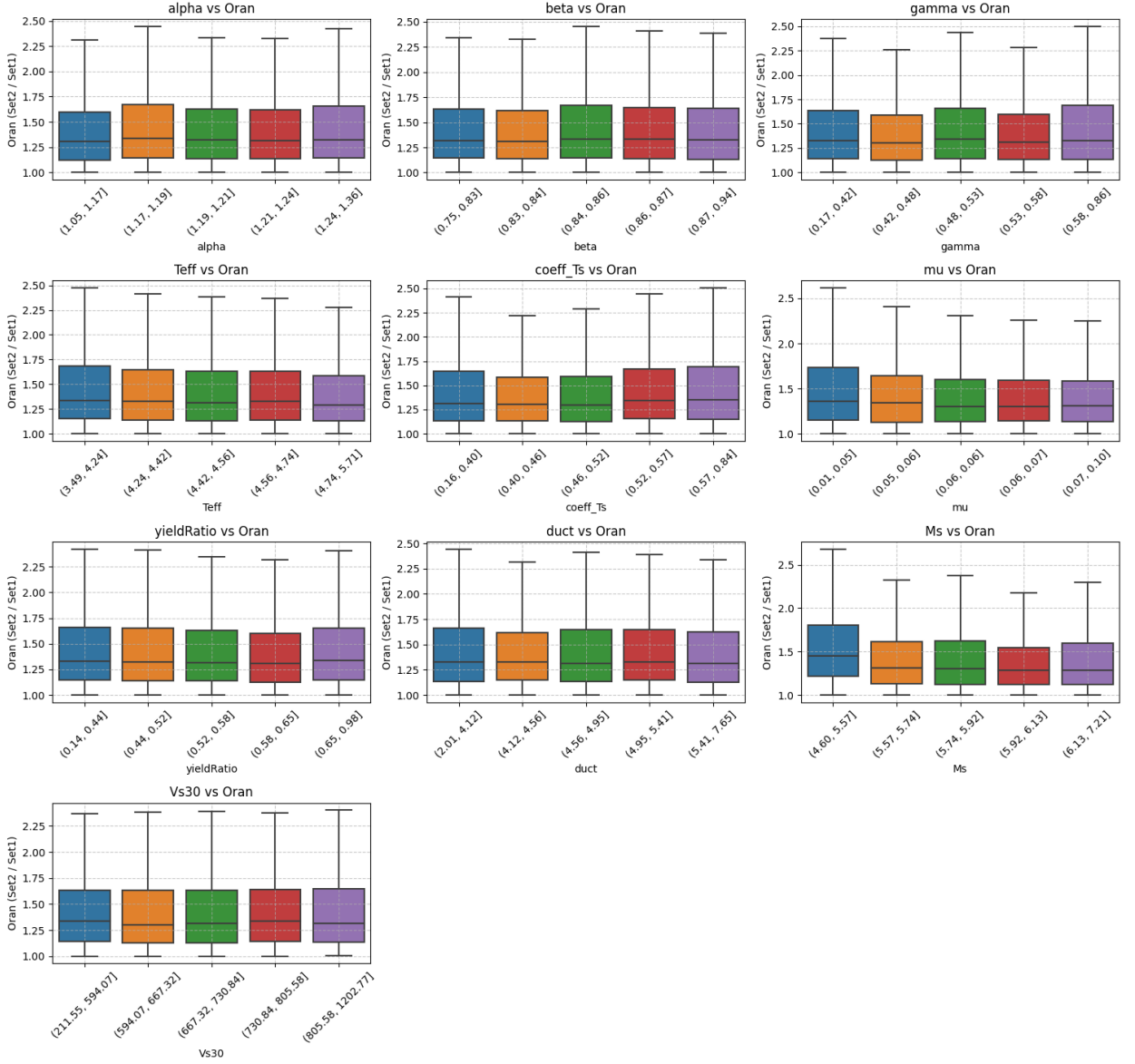
Şekil 4.39. Maksimum izolatör kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)

Mak. İzolatör Dep. Oranı



Şekil 4.40. Maksimum izolatör deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)

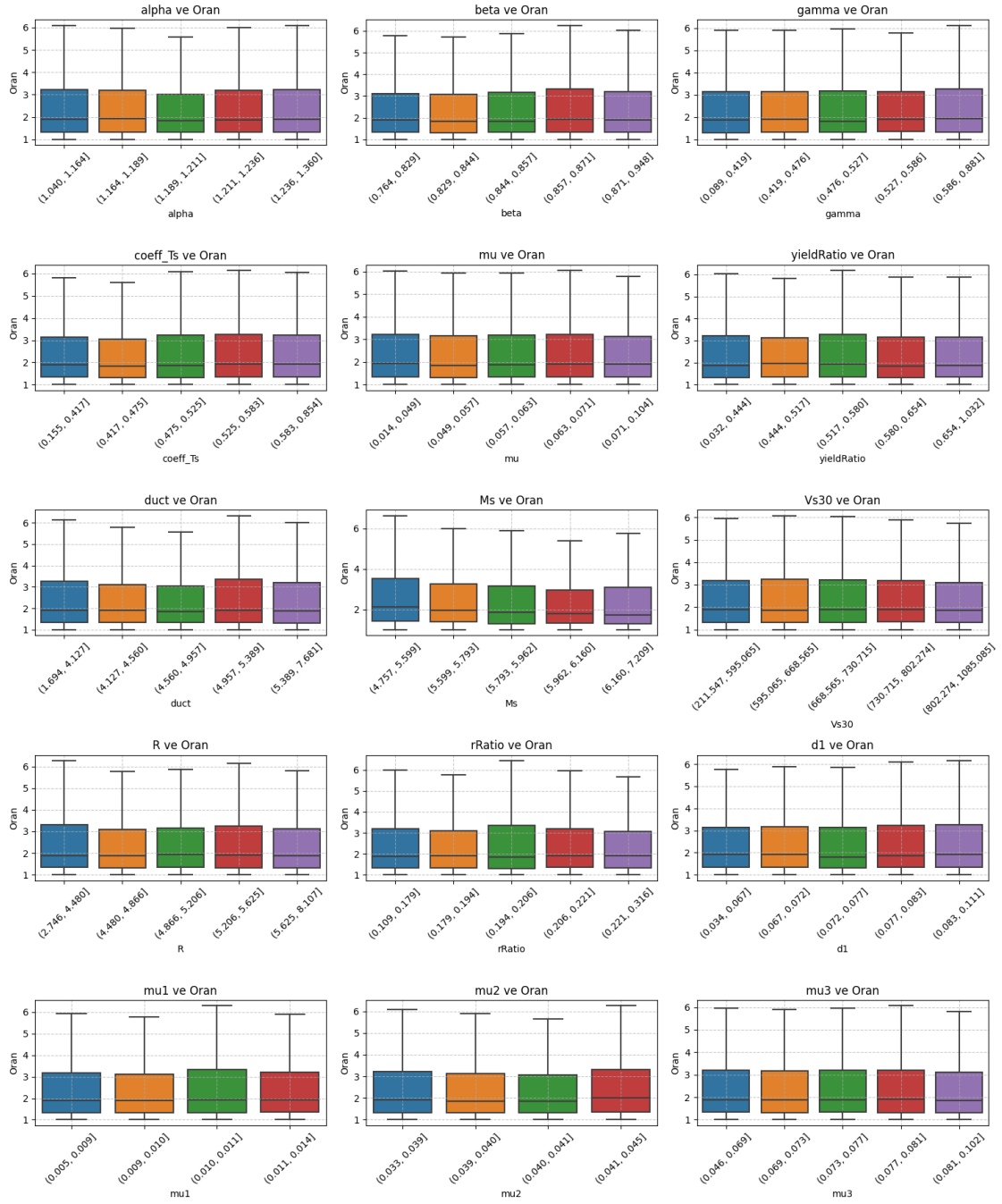
Mak. Göreceli Dep. Oranı



Şekil 4.41. Maksimum göreceli (relatif) deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (iki yüzeyli için)

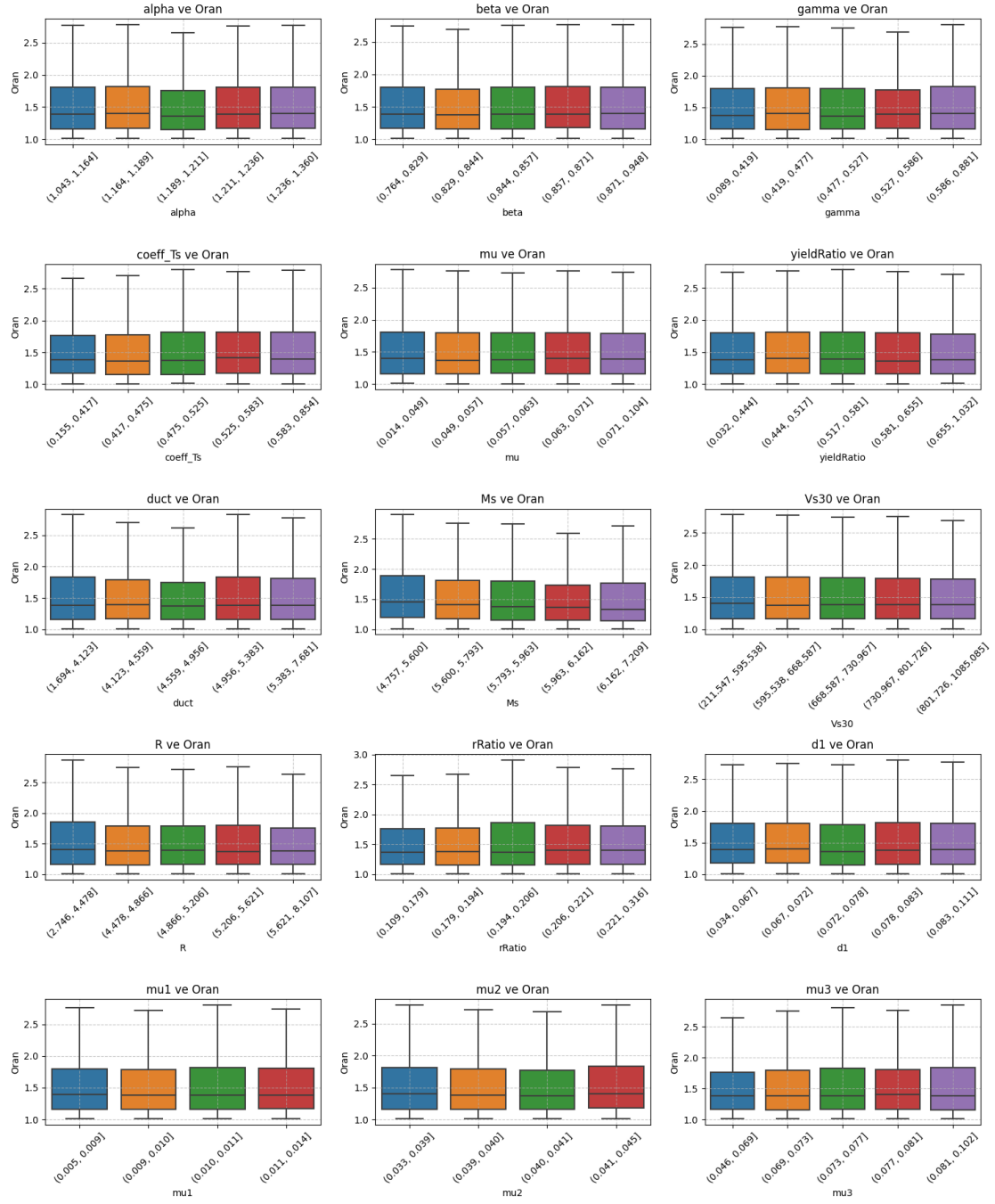
İki yüzeyli sürtünmeli sistemlerde olduğu gibi üç yüzeyli sistemler için de kutu grafikleri verilmiştir. Ancak üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemlerinde parametreler iki yüzeyli sistemlere göre farklılık gösterdiği için parametre sayısı fazladır. Aşağıda yer alan Şekil 4.42-4.45 üç sürtünme yüzeyli sistemlere ait kutu grafiklerini göstermektedir.

Mak. İzolatör Dep. Oranı



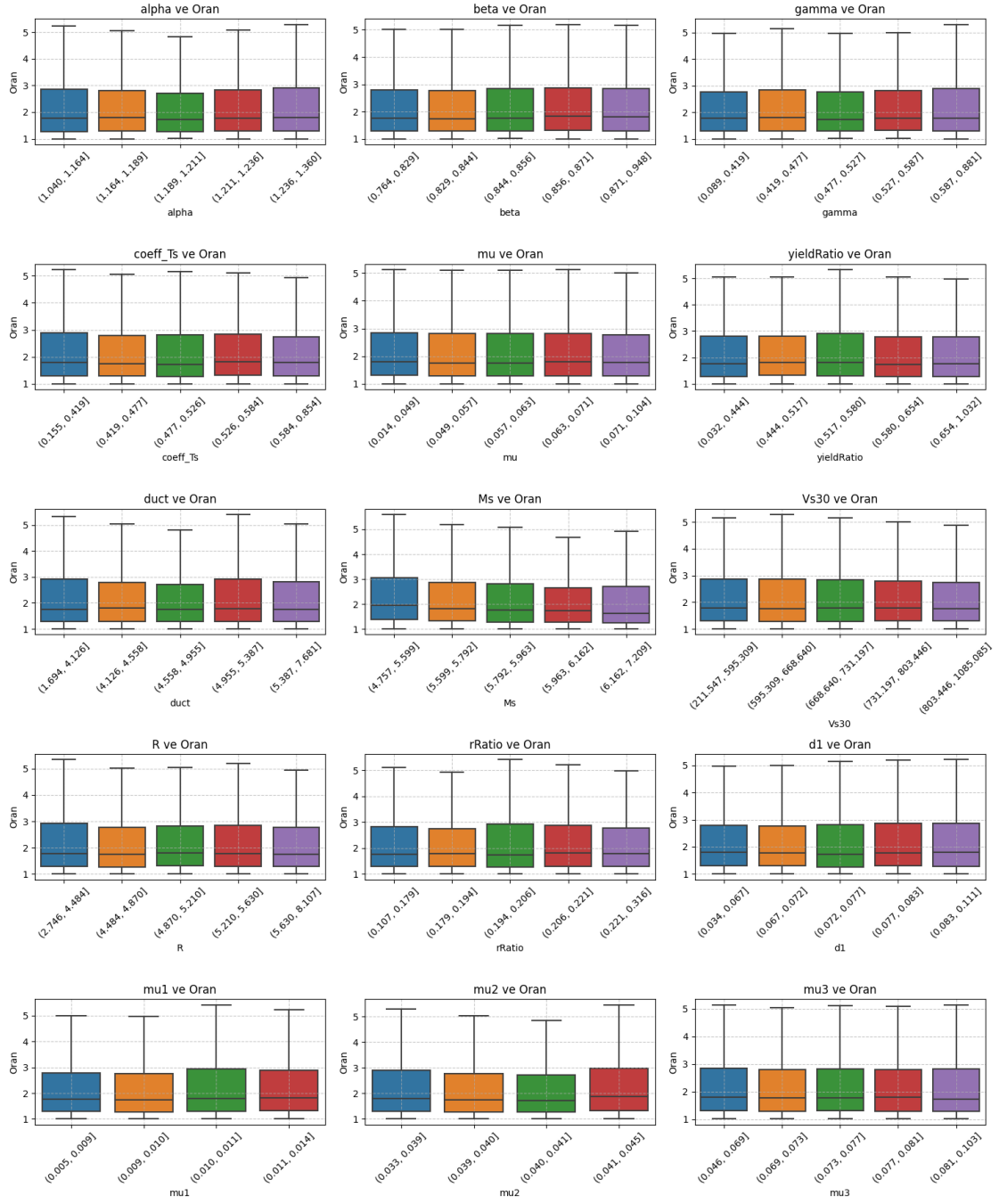
Şekil 4.42. Maksimum izolatör deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)

Mak. İzolatör Kuvveti Oranı



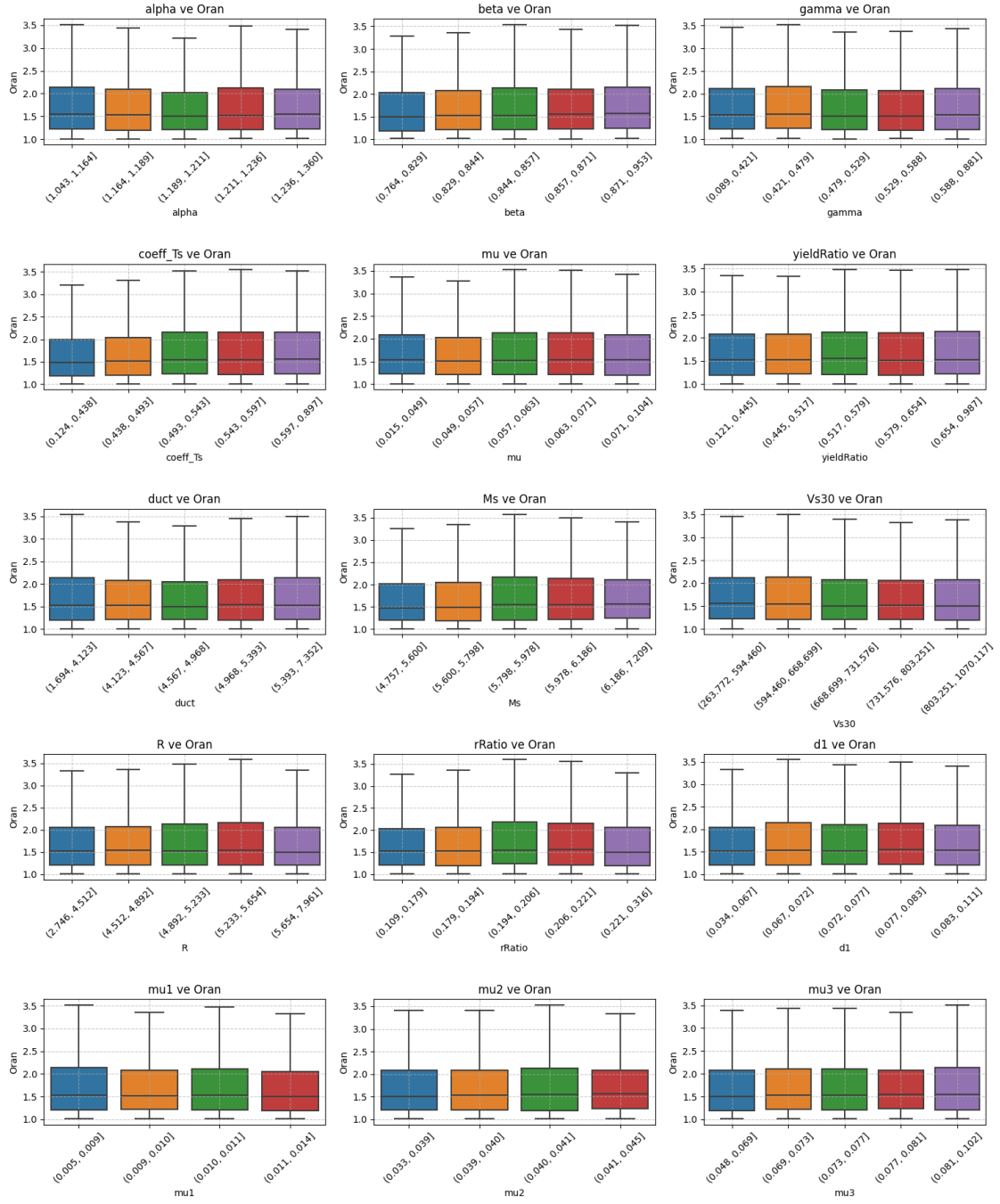
Şekil 4.43. Maksimum izolatör kuvveti için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)

Mak. Yapı Dep. Oranı



Şekil 4.44. Maksimum yapı deplasman oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)

Mak. Yapısal Kuvvet Oranı



Şekil 4.45. Maksimum yapısal kuvvet oranı için verilen parametre değişim sütunları (üç yüzeyli için)

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında tekrarlı depremler altında sürtünmeli sarkaç sistemleri ile sismik izolasyonlu yapıların davranışı incelenmiştir. Oluşturulan izolatör ve üst yapı modellerine ait elli bin adet parametreye bağlı olarak zaman tanım alanında deprem analizleri yapılmıştır. Oluşturulan deprem serisi, içerisinde elli farklı deprem olayına ait data barındırmaktadır. Bu deprem kayıtlarına ait her iki doğrultudaki bileşen ise oluşturulan modellere ayrı ayrı olarak etki ettirilmiştir. Böylece yüz adet deprem kaydı kullanılmıştır. Bu depremler içerisinde bir adet deprem rastgele seçilerek ana şok olarak, oluşturulan ve elli bin parametre arasından rastgele seçilen izolatör ve üst yapı parametrelerine bağlı olarak meydana gelen modele uygulanmıştır. Ana şok depreminin etkisi tamamen ortadan kalktıktan sonra yapıda kalıcı talepler mevcut iken artçı şok depreminin yapı modeline uygulanması aşamasına geçilmiştir. Burada ise artçı şok ile ana şok depremi arasında oluşan spektral ivme değerleri oranının belli bir katı olması gerekmektedir ve bu oran literatürde yer alan bir çalışmaya bağlı olarak belirlenmiştir. Rastgele olarak seçilen ana şok değerinden sonra ise artçı şokun oranının belli bir katsayı ile çarpılarak yapıya etki ettirilmesi sonucunda ise hem ana hem de artçı şok depremi analizi yapılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda hem üstyapı hem de izolatöre ait bazı tepkiler irdelenmiştir. Bu parametreler genel olarak izolatör ve üst yapıda meydana gelen yer değiştirme ve kesme kuvveti değerleridir. Ayrıca yine yapı üzerinde ve izolatördeki kalıcı deplasman ve kuvvet değerleri de ayrıca araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda analizlerden elde edilen ana şok ve artçı şok depremi talep değerleri sadece ana şok etki ettirilen analizlerden elde edilen talep değerleri ile normalize edilerek bir oran bulunmuştur. Bu oran her bir yapı ve izolatör talep değerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesap hem iki hem de üç sürtünme yüzeyli izolatörler için gerçekleştirilmiştir.

Bu normalize edilmiş değer tepki oranı olarak adlandırılmış ve datanın güvenilirliğini artırmak amacı ile bazı filtreler uygulandıktan sonra kullanılmıştır. Her bir yapı parametresine ait bu oran değeri hem tüm seri için hem de sadece oranın birden büyük olduğu yani ana ve artçı şok depremlerinin etki etmesi durumunda ana şok depremine göre talep değerinde artış meydana gelen durumlar için ayrı ayrı elde edilmiştir. Her bir data serisi içerisinde yer alan değerlerin aritmetik ortalamaları ve bu değerlere ait kümülatif dağılım fonksiyonları da ayrıca verilmiştir. Buna ek olarak her bir serinin değerlendirmesinde kullanılan toplam data adedi de ayrıca verilmiştir. Çünkü filtrelemelerden sonra bazı

dataların değerlendirme dışı kaldığından verilen bilgilerin değerlendirmesinde kullanılan data sayısı bildirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre artçı depremlerin en çok yapıların kalıcı deplasman değerleri üzerinde etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Hem iki hem de üç sürtünme yüzeyli izolatör sistemlerinde kalıcı izolatör ve yapı deplasman değerleri ana ve artçı şok etki etmesi durumunda ana şoka göre 4-5 katı civarında olabilmektedir.

Maksimum üst yapı deplasman değeri incelendiğinde artçı şok depremi her iki tür izolatör sisteminde de tüm seri ortalamasına göre %2-3 civarında bir artışa neden olmaktadır. Sadece tepki oranı değerinin birden büyük olduğu durumlar dikkate alındığında bu değer yaklaşık 2 civarındadır. Maksimum izolatör deplasman değerinde ise çift yüzeyli sistemlerde %3, üç yüzeyli sistemlerde ise %6 civarında bir izolatör yer değiştirmesi artışı gözlenmiştir. Bu sonuç göstermektedir ki yapılacak olan tasarımlarda bina çevresinde bırakılacak boşluk miktarı artçı şok depremi göz önüne alınır ise sadece ana şok depremine göre bir miktar artırılmalıdır.

Ayrıca tepki oranı değerinin birden büyük olduğu durumlar için farklı girdi parametrelerinin etkisi her bir oran değeri için araştırılmıştır. Bu bağlamda kutu grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafiklere bağlı olarak elde edilen sonuçlara göre izolatörün etkili periyodunun, sürtünme katsayısının, yapının akmadan sonra maksimum kuvvete ulaşması için ulaşması gereken deplasman değerinin, akma dayanımını yapı ağırlığı cinsinden ifade eden akma katsayısının ve ana şok depremi magnitüd değerinin maksimum izolatör deplasmanı oranında etkili olduğu ortaya konmuş ve bunlar özelinde değerlendirmeler yapılmıştır. Bu yorumlar diğer belirlenen talep parametreleri için de ortaya konmuştur. Sadece iki yüzeyli izolatörler değil aynı zamanda üç yüzeyli izolatör sistemleri için yapılan analizler sonucunda elde edilen oranlara bağlı olarak da bu değerlendirmeler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki bir sürtünmeli sarkaç sistemi ile izole edilen yapıların hem ana şok hem de artçı şok depremine maruz kalmaları durumunda elde edilecek olan talep değerleri sadece ana şok depreminin göz önüne alındığı duruma göre farklı olabilmektedir. Bu fark bir oran değeri olarak bu çalışma kapsamında açıklanmıştır. Elde edilen bu oran yapılacak olan izolatörlü yapı tasarımında artçı şok depremlerinin dikkate alınmasında kullanılabilecektir. Sadece ana şok depremi dikkate alınarak yapılan tasarımlardan elde edilen talep değerleri bu çalışma kapsamında ortaya konan katsayılar ile çarpılarak zaman gerektiren analizler yapılmadan tepki tahmini artçı şok depremi sonrası

için yapılabilir. Ayrıca bu oran değerinin istatistiksel olarak değerlendirmesi de yapıldığından verilen kümülatif dağılım fonksiyonları ile farklı aşıma olasılıklarına sahip olarak bu katsayılar da seçilebilir. Böylece önem katsayısı yüksek olan binalar için veya farklı performans seviyeleri için bu grafiklerden seçim yapılabilir. Her bir yapısal tepki ve izolatör parametreleri verilen oran değerlerine göre belirlenecek ve hem yapısal elemanlar, hem izolatörler bu değerlere göre seçilerek artçı deprem sonrasında da tahmin edilerek tasarımı yapılan bir yapının deprem davranışı istenilen düzeyde olacaktır. Böylece depreme dirençli ve davranışı gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilen yapıların inşa edilmesi, yaşam alanlarında yer alan bu yapıların bir deprem durumunda herhangi bir olumsuzluk yaşamadan ve hayatın akışını bozacak şekilde deformasyona uğramadan depremi atlamaı sağlanabilir.



6. KAYNAKLAR

- Ali, H.-E. M., & Abdel-Ghaffar, A. M. (1995). Modeling of rubber and lead passive-control bearings for seismic analysis. *Journal of Structural Engineering*, 121(7), 1134-1144.
- Atkinson, G. M. (1993). Earthquake source spectra in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(6), 1778-1798.
- Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A. (2015, August). U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. In *Structures* (Vol. 3, pp. 163-171). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.04.003>
- Bhuta, P. G., & Koval, L. R. (1966). A viscous ring damper for a freely precessing satellite. *International Journal of Mechanical Sciences*, 8(5), 383-395.
- Boore, D. M., vd. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
- Buckle, I. G., & Mayes, R. L. (1990). Seismic isolation: history, application, and performance—a world view. *Earthquake Spectra*, 6(2), 161-201.
- Calantarients, J. (1909). *Improvements in and connected with building and other works and appurtenances to resist the action of earthquakes and the like*. Engineering Library, Stanford University, Stanford, California.
- Calvi, G. M., vd. (2004). Effects of axial force variation in the seismic response of bridges isolated with friction pendulum systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(spec01), 187-224.
- Cao, S., vd. (2024). Experimental and numerical investigations on adaptive stiffness double friction pendulum systems for seismic protection of bridges. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 176, 108302.
- Carrier, G., & Miles, J. (1960). On the annular damper for a freely precessing gyroscope. <https://doi.org/10.1115/1.3643944>
- Chen, B., vd. (2022). Research and development of high-performance high-damping rubber materials for high-damping rubber isolation bearings: A review. *Polymers*, 14(12), 2427. <https://doi.org/10.3390/polym14122427>

- Choun, Y.-S., vd. (2014). Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions. *Nuclear Engineering and Technology*, 46(5), 605-618.
- Constantinou, M. C., vd. (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*. MCEER.
- Constantinou, M. C., vd. (2007). Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading. **10.13140/RG.2.1.4633.8166**
- Coran, A. Y. (1994). Vulcanization. In *Science and technology of rubber* (pp. 339-385). Elsevier.
- Craig, J. I., vd. (2007). Response modification applications for essential facilities. *MAE Center CD Release 07-07*.
- Crosby, P., vd. (1994). Utilizing visco-elastic dampers in the seismic retrofit of a thirteen story steel framed building. *Structures congress XII*, (pp. 1286-1291), ASCE.
- Deng, X., vd. (2010). Study on the theoretical analysis and numerical simulation of double concave friction pendulum isolation bearing. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 9(4), 71-77.
- Diotallevi, P., & Landi, L. (2006). Response of RC structures subjected to horizontal and vertical ground motions. In *Proceedings of the" 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake"* (pp. 1-10), Mira Digital Publishing.
- Diotallevi, P. P., vd. (2006). Effect of near-fault ground motions on the response of base-isolated structures. In *Proceedings of the" 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake"*, (pp. 1-10), Mira Digital Publishing.
- Dolce, M., vd. (1996). Experimental tests and applications of a new biaxial elasto-plastic device for the passive control of structures. *Special Publication*, 164, 651-674.
- Douglas, J., & Halldórsson, B. (2010). On the use of aftershocks when deriving ground-motion prediction equations. *Proceedings of the 9th US national and 10th Canadian conference on earthquake engineering, paper* (No. 220).

- Erdey, C. K. (2007). *Earthquake engineering: application to design. (No Title)*. Willey Online Library. [10.1002/9780470168042](#)
- Farzam, M. F., vd. (2020). Current trends in the optimization approaches for optimal structural control. *Advances in structural engineering—Optimization: emerging trends in structural optimization*, 133-179.
- FEMA. (2009). Quantification of building seismic performance factors. US Department of Homeland Security, FEMA.
- Fenz, D. M. (2008). Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings. *State University of New York at Buffalo*.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2006). Behaviour of the double concave friction pendulum bearing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(11), 1403-1424.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008a). Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008b). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008c). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(2), 185-205.
- Frahm, H. H. (1911). Results of trials of the anti-rolling tanks at sea. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 23(2), 571-597.
- Froude, W. (1861). On the rolling of ships. *Transaction of the Institution of Naval Architects*, 2.
- Ghabili, K., vd. (2012). Lessons from the recent twin earthquakes in Iran. *PLOS Currents Disasters*.
- Goda, K., & Taylor, C. A. (2012). Effects of aftershocks on peak ductility demand due to strong ground motion records from shallow crustal earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(15), 2311-2330.

- Gong, J., & Zhou, Y. (2010). State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (I): types and performance of friction pendulum bearings. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 32(3), 1-10.
- Gutierrez Soto, M., & Adeli, H. (2013). Tuned mass dampers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 419-431.
- Habib, A., vd. (2021). Comparative study of base-isolated irregular RC structures subjected to pulse-like ground motions with low and high PGA/PGV ratios. In *Structures*, (Vol. 31, pp. 1053-1071). Elsevier.
- Hatzigeorgiou, G. D., & Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 30(10), 1010-1025.
- Housner, G., vd. (1997). Structural control: past, present, and future. *Journal of engineering mechanics*, 123(9), 897-971.
- Ibarra, L. F., vd. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(12), 1489-1511.
- Ibrahim, R. (2008). Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. *Journal of sound and vibration*, 314(3-5), 371-452.
- Islam, A., vd. (2011). Seismic isolation in buildings to be a practical reality: behavior of structure and installation technique. *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(4), 99-117.
- Javanmardi, A., vd. (2020). State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2), 455-478.
- Kasai, K., & Kibayashi, M. (2004). JSSI manual for building passive control technology. PART-1 Manual contents and design/analysis methods. *Proceedings 13 th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver. Canada. Paper No 2989.
- Kasai, K., vd. (2008). Current status of building passive control in Japan. *The 14th World conference on earthquake engineering*, Beijing, China.
- Keel, C., & Mabmoodi, P. (1986). Design of viscoelastic dampers for Columbia Center Building. In *Building motion in wind*,(pp. 66-82). ASCE.

- Kelly, J. M. (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 5(4), 202-216.
- Kelly, J. M. (1990). Base isolation: linear theory and design. *Earthquake Spectra*, 6(2), 223-244.
- Kelly, J. M. (1993). Earthquake-resistant design with rubber (Vol. 7), *Springer*.
- Kim, B., & Shin, M. (2017). A model for estimating horizontal aftershock ground motions for active crustal regions. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 92, 165-175.
- Kim, H., & Adeli, H. (2005a). Hybrid control of irregular steel highrise building structures under seismic excitations. *International journal for numerical methods in engineering*, 63(12), 1757-1774.
- Kim, H., & Adeli, H. (2005b). Hybrid control of smart structures using a novel wavelet-based algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(1), 7-22.
- Kobori, T., vd. (1992). Development and application of hysteresis steel dampers. *Proceedings of the 10th World conference on earthquake engineering*.
- Konar, T., & Ghosh, A. (2023). A review on various configurations of the passive tuned liquid damper. *Journal of Vibration and Control*, 29(9-10), 1945-1980.
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2024). *Geotechnical earthquake engineering*. CRC Press.
- Kumar, M., vd. (2014). An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(13), 1955-1974.
- Kurmann, D., vd. (2015). A Base-Isolated System for Severe Accident Management at Beznau NPP. *Transactions, SMiRT-23, Manchester, UK*.
- Landi, L., vd. (2016). Comparison of different models for friction pendulum isolators in structures subjected to horizontal and vertical ground motions. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 81, 75-83.
- Lee, D., & Constantinou, M. C. (2016). Quintuple friction pendulum isolator: Behavior, modeling, and validation. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1607-1626.
- Li, A., vd. (2021). Research progress on temperature dependence of rubber isolation bearings. *J. Build. Struct*, 42(7).

- Li, Q., & Ellingwood, B. R. (2007). Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock–aftershock earthquake sequences. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(3), 405-427.
- Lignos, D.G. (2008). *Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations* (Order No. 3332869). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (304469377). <https://www.proquest.com/dissertations-theses/sidesway-collapse-deteriorating-structural/docview/304469377/se-2>
- Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, 137(11), 1291-1302.
- Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2013). Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering. *Journal of Structural Engineering*, 139(8), 1382-1394.
- Lignos, D. G., vd. (2011). Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(7), 807-825.
- Low, S., vd. (1989). *Seismic isolation using the Friction Pendulum system*. In Transactions of the 10th international conference on structural mechanics in reactor technology, (pp. 607-612). <https://www.scribd.com/document/900022236/1-Seismic-isolation-using-the-friction-pendulum-system-V-Sayas-and-S-Mahin> actor technology.
- Luco, N., vd. (2004). Dynamic versus static computation of the residual capacity of a mainshock-damaged building to withstand an aftershock. *13th World conference on earthquake engineering*.
- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(2), 269-283.
- Maldonado-Mercado, J. C. (1995). Passive and active control of structures, (*Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology*).
- Malekzadeh, M., & Taghikhani, T. (2010). Adaptive behavior of double concave friction pendulum bearing and its advantages over friction pendulum systems.

- Markou, A. A., & Manolis, G. D. (2016). Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 90, 221-226.
- Martinelli, P., & Mulas, M. G. (2010). An innovative passive control technique for industrial precast frames. *Engineering structures*, 32(4), 1123-1132.
- Mazza, F. (2015). Nonlinear incremental analysis of fire-damaged rc base-isolated structures subjected to near-fault ground motions. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 77, 192-202.
- Mazza, F., & Vulcano, A. (2008). Effects of horizontal and vertical nearfault ground motions on the nonlinear dynamic response of rc buildings with different base-isolation systems. *14th world conference on earthquake engineering*.
- Mazza, F., & Vulcano, A. (2012). Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated rc framed buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2), 211-232.
- Mazza, F., vd. (2012). Nonlinear dynamic response of RC buildings with different base isolation systems subjected to horizontal and vertical components of near-fault ground motions.
- McKenna, F. T. (1997). *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing*. University of California, Berkeley.
- McVitty, W. J., & Constantinou, M. C. (2015). Property modification factors for seismic isolators: design guidance for buildings. *MCEER report*, 242.
- Mokha, A., vd. (1991). Experimental study of friction-pendulum isolation system. *Journal of Structural Engineering*, 117(4), 1201-1217.
- Morgan, T. A. (2007). *The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives*. University of California, Berkeley.
- Morgan, T. A., & Mahin, S. A. (2008). The optimization of multi-stage friction pendulum isolators for loss mitigation considering a range of seismic hazard. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.

- Nagarajaiah, S., & Sun, X. (2001). Base-isolated FCC building: impact response in Northridge earthquake. *Journal of Structural Engineering*, 127(9), 1063-1075.
- Nagarajaiah, S., & Xiaohong, S. (2000). Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake. *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1177-1186.
- Nakashima, M., vd. (1996). Energy input and dissipation behaviour of structures with hysteretic dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(5), 483-496.
- Nguyen, N., vd. (2018). Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Ozkaya, C., vd. (2011). Development of a new rubber seismic isolator: 'Ball Rubber Bearing (BRB)'. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(12), 1337-1352.
- Papazoglou, A., & Elnashai, A. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(10), 1109-1137.
- Parulekar, Y., & Reddy, G. R. (2009). Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(01), 151-177.
- Pecchillo, G. (2018). 3D seismic base isolation of large structures using elastomeric bearings.
- Prucz, J. C., vd. (1988). Advanced joining concepts for passive vibration control. *Journal of Aerospace Engineering*, 1(4), 193-205.
- R. I. Skinner, vd. (1974). A practical system for isolating structures from earthquake attack. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 297-309.
- Robinson, W. H. (1982). Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(4), 593-604.
- Roorda, J. (1980). Experiments in feedback control of structures.
- Ruiz-García, J. (2012). Mainshock-aftershock ground motion features and their influence in building's seismic response. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(5), 719-737.

- Saaed, T. E., vd. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. *Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919-937.
- Sarlis, A. A., & Constantinou, M. C. (2013). *Model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions*. Technical Report MCEER-13-0010. **10.1002/eqe.2738**
- Sarlis, A. A., & Constantinou, M. C. (2016). A model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(11), 1837-1853.
- Shcherbakov, R., & Turcotte, D. L. (2004). A modified form of Bath's law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5), 1968-1975.
- Shcherbakov, R., vd. (2005). Aftershock statistics. *Pure and Applied Geophysics*, 162(6), 1051-1076.
- Shen, C., vd. (2012). Dependency test research of mechanical performance of HDR and its parametric value analysis. *Dizhen Gongcheng yu Gongcheng Zhendong (Earthquake Engineering and Engineering Vibration)*, 32(6), 95-103.
- Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Elsevier.
- Srinath, G., & Gopikrishna, K. (2024). Influence of Repeated Earthquake events on Structural Response of Multi-storeyed RC buildings. In *Structures*. (Vol. 67, p. 106911). Elsevier.
- Survey, S. o. t. U. G., & Center, t. S. C. E. (1994). The magnitude 6.7 Northridge, California, earthquake of 17 January 1994. *Science*, 266(5184), 389-397. **<https://doi.org/10.1126/science.266.5184.389>**
- Symans, M. D. (2009). Seismic protective systems: seismic isolation. *Instructional material complementing FEMA*, 451.
- Symans, M. D., & Constantinou, M. C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering structures*, 21(6), 469-487.

- Tachibana, E., & Li, K. (1996). Temperature dependence of high damping rubber in base-isolated structures. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico. Paper.*
- Tirca, L.-D., vd. (2003). Response of middle-rise steel frames with and without passive dampers to near-field ground motions. *Engineering structures*, 25(2), 169-179.
- Torunbalci, N. (2003). Earthquake protective systems in civil engineering structures-evolution and application. *WIT Transactions on The Built Environment*, 72.
- Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300-325.
- Watts, P. (1883). On a method of reducing the rolling of ships at sea. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 24, 165-190.
- Watts, P. (1885). The use of water chambers for reducing the rolling of ships at sea. *Transactions of Institution of Naval Architects*, 26, 30.
- Weisman, J., & Warn, G. P. (2012). Stability of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 215-223.
- Wolff, E. D. (1999). Frictional heating in sliding bearings and an experimental study of high friction materials *State University of New York at Buffalo*.
- Wu, Y., vd. (2019). Seismic performance of a new structural design solution for first-story isolated RC buildings with coupled beam-column connections. *Applied Sciences*, 9(1), 177.
- Xu, G., vd. (2025). Advances and challenges in friction pendulum bearings for seismic isolation systems. *Advances in Structural Engineering*, 28(3), 407-423.
- Yenidogan, C. (2021). Earthquake-resilient design of seismically isolated buildings: A review of technology. *Vibration*, 4(3), 602-647.
- Yenidoğan, C. (2024). Deprem Yalıtımlı ve Ankastre Temelli Betonarme Yapıların Performansının TBDY-2018 Kapsamında Kıyaslamalı Olarak Değerlendirmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(3), 767-781.
- Zahid, M., vd. (2012). Effect of repeated near field earthquake to the high-rise Rc building. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(10), 129-138.

- Zayas, V., vd. (1996). Testing of friction pendulum seismic isolation bearings for bridges. *Special Publication*, 164, 613-632.
- Zayas, V., vd. (1993). Summary of Testing of the Friction Pendulum Seismic Isolation System: 1986-1993. *Proc., ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, Applied Technology Council, San Francisc.*
- Zayas, V. A., & Mahin, S. A. (1987). The FPS earthquake resisting system experimental report. *Earthquake Engineering Research Center.*
- Zhang, F., vd. (2023). Experimental and simulation studies of adaptive stiffness double friction pendulum bearing. *Structures.*
- Zhang, Y., vd. (2019). Study of the correlations between main shocks and aftershocks and aftershock synthesis method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(4), 759-775.
- Zhou, F., vd. (2019). Theoretical study of the double concave friction pendulum system under variable vertical loading. *Advances in Structural Engineering*, 22(8), 1998-2005.
- Zhu, M., vd. (2018). *OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework.* *SoftwareX*, 7, 6-11.