

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI BİLİM DALI

MAFSAL ÖZELLİKLİ SÜRTÜNME TİPİ SİSMİK SÖNÜMLEYİCİ

Recep SUK

Danışman
Prof. Dr. Gökhan ALTINTAŞ



MANİSA-2019

TEZ ONAYI

Recep SUK tarafından hazırlanan "**Mafsal özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyici**" adlı tez çalışması 08/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak savunulmuş ve **oyçokluğu / oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Prof. Dr. Gökhan ALTINTAŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Erkan DOĞAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç.Dr. Ayhan NUHOĞLU
Ege Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mehmet ORHAN
Gazi Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr.Ögr. Üyesi Abdulkерim ERGÜT
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celalbayer Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Recep SUK



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ	IX
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Sönümleyiciler Üzerine Yapılmış Çalışmalar	2
1.1.1. Metal- Akma Prensibine Sahip Sönümleyiciler.....	3
1.1.1.1. Adas Metal Sönümleyiciler	3
1.1.1.2. Tadas Metal Sönümleyiciler	4
1.1.1.3. Diğer Metal Sönümleyiciler.....	5
1.1.2. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	10
1.1.2.1. Pall Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	10
1.1.2.2. F.D.D Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	12
1.1.2.3. Sumitomo Pasif Enerji Yayma Sistemleri.....	13
1.1.2.4. Piezo elektrik Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	15
1.1.2.5. Enerji Yayılımı Kısıtlayıcı Araçları (EDR).....	16
1.1.2.6. Damptech Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	17
1.1.3. Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler	22
1.1.4. Viskoelastik Sönümleyiciler	22
1.1.5. Aktif Sönümleyiciler.....	23
1.1.6. Yarı Aktif Sönümleyiciler	25
2. GENEL BİLGİLER	26
2.1. Sönüm.....	26
2.2. Sönümleme Çeşitleri	28
2.4. Sönüm Katsayısı.....	28
2.5. Kritik Sönüm	30
2.6. Tek Serbestlik Dereceli Sönümlü Sistem	31
2.7. Ek Sönüm	33
2.7.1. Modal Şekil Değiştirme Enerjisi Yöntemi.....	33
2.7.1.1. Yöntem.....	33

2.7.2. ASCE/FEMA Yaklaşımı ile Sönüm Hesabı	38
2.7.2.1. Yöntem.....	38
2.7.3. Ek Sönüm Örnek.....	39
2.8. Sürtünme	40
2.9. Sürtünme Kanunları	40
2.10. Sürtünme Teorileri	40
2.10.1. Mekanik Kilitlenme Teorisi.....	41
2.10.2. Moleküler Çekim Teorisi.....	41
2.10.3. Elektrostatik Kuvvetler	41
2.10.4. Kaynaklaşma, Kesme-Kazıma.....	41
2.11. Sonlu Elemanlar Yöntemi	43
3. TEORİK ÇALIŞMA	50
3.1. Sürtünme Modelinin Oluşturulması	50
3.1.1. Coulumb Sürtünme Modeli	50
3.1.2. Ark tanjant Modeli.....	52
3.1.3. Değiştirilebilir Adım Fonksiyonu Modeli	54
3.2. Mafsal Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyicinin üç boyutlu Sonlu Elemanlar Modelini Oluşturulması	55
3.3. Saplama Öngerme Kuvvetine Bağlı Reaksiyon Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Hesaplanması.....	60
3.3.1. Saplamalara 110kN Ön-germe Kuvveti Uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri	60
3.3.2. Saplamalara 154 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri	61
3.3.3. Saplamalara 220 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri	62
3.3.4. Saplamalara 286 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri	63
3.3.5. Saplamalara 396 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri	64
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	66
4.1. Materyal.....	66
4.2. Yöntem	67
4.2.1. Çelik malzemesi akma dayanımının belirlenmesi	67
4.2.2. Sürtünme Pedlerinin Basıç Altında Davranışının Tespit Edilmesi.....	69
4.2.3. Saplama- Gerdirme Elemanlarının Gerilme Açısından İncelenmesi.....	70

4.3. Mafsal Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyicinin Deney Düzenekinin Oluşturulması	71
4.3.1. Sönümleyiciye ait Saplamların Sıkıştırılması	72
4.3.2. Deneyler için Veri Toplama Setinin Hazırlanması	74
4.4. Deneyler Sonuçları	76
5. MAFSAL ÖZELLİKLİ SÜRTÜNME TİPİ SİSMİK SÖNÜMLEYİCİ’NİN YAPI ÜZERİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ.....	81
5.1. Sönümleyici Cihaz Kullanılan ve Kullanılmayan İki Katlı Özdeş İki Bina için Deplasman ve Periyot Karşılaştırmaları	81
5.1.1. Yapı Modelinin Oluşturulması	82
5.1.2. Link Eleman Tanımları	82
5.1.3. Wen Plastik Özellikleri	82
5.2. Performans Analizi	85
5.2.1. İtme Analizi (Pushover)	85
5.2.1.1. Performans Seviyeleri	85
5.2.1.2. Yapısal Performans Seviyeleri	86
5.2.1.3. Yapı Performans Seviyeleri	87
5.3. Deprem Etkisi	89
5.3.1. Servis Deprem	89
5.3.2. Tasarım depremi	89
5.3.3. Maksimum Deprem	89
5.4. Sönümleyici cihaz kullanılan ve Kullanılmayan Özdeş Yapılar İçin Tasarım Depremi Altında Performans Araştırması Yapılması	90
5.4.1. Sönümleyici Cihaz Kullanılmayan Binanın Performans Düzeyinin Araştırılması	90
5.4.2. Sönümleyici Cihaz Kullanılan Binanın Performans Düzeyinin Araştırılması	95
5.4.2.1. Sönümleyici Özellikleri	95
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	99
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	107

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

β_H	Sönüm Yönü için Sönümleyici Sistem Elemanında Akma Durumundan Sonra Oluşan Histerik Davranış
β_I	Yapı İçsel Sönümü
β_v	Yatay Yük Taşıyıcı Sistemin Efektif Akma Yer Değiştirme Yada Hemen Öncesinde Sönümlendiği Viskoz Enerjiyi Dikkate Alan Bileşen
C	Sönüm Katsayısı
C_r	Kritik Sönüm
D_y	Akma Yer değiştirmesi
D_{eff}	Efektif Akma noktasında Çatı Seviyesinde oluşan Deplasman
D_Fs	Sürtünme Kuvveti
D_I	Çatı Seviyesinde Oluşan Deplasman
E	Elastisite Modülü
ED	Sönümlenen Enerji
ES	Yapısal Sistemin Şekil Değiştirme Enerjisi
F_y	Akma Kuvveti
F_N	Temas Yüzeyine Etki Eden Kuvvet
F_s	Hareketi Başlatan Kuvvet
f_t	Tanjantianal Sürtünme Kuvveti
F_n	Normal Kuvvet
σ_t	Tanjantianal Sürtünme Gerilmesi
σ_n	Normal Gerilme
K_i	Rijitlik Matrisi
K	Sistem Rijitliği
M_i	Kütle Matrisi
μ	Sürtünme Katsayısı
μ_k	Kinetik Sürtünme Katsayısı
μ_s	Statik Sürtünme Katsayısı
q_H	Histerik döngü Düzeltme Faktörü
Q	Pürüz kısmı Taban Açısını
T	Periyot
t	Zaman
U_0	Dalga Genişliği

x_d	Sönümleyicide Oluşan Maksimum Yer Değiştirme
ω	Sönümsüz Sistem Açısal Frekansı
ω_D	Sönümlü Sistem Açısal Frekansı
w	Sisteme Etkiyen Harmonik Kuvvetin Frekansı
x_0	Başlangıç Yer Değiştirmesi
$\dot{x}_0$	Başlangıç Hızı
Ω	Frekans
ξ	Sönüm Oranı
ASCE	Amerika İnşaat Mühendisleri Birliği
ASI	Analog Sinyal
CP	Göçme Öncesi
EDR	Enerji Yalıtım Katsayısı
FDD	Sürtünme Tipi Sönümleyici Cihaz
FEMA	Federal Acil Durum yönetim Kurumu
IO	Hemen kullanım
LS	Can Güvenliği
NP-A	İşlevsel Performans Seviyesi
NP-B	Hemen kullanım performans Seviyesi
NP-C	Can Güvenliği Performans Seviyesi
NP-D	Azaltılmış hasar Performans Seviyesi
NP-E	Hasarın Göz önüne Alınmadığı Performans Seviyesi
RVCNST	Göreceli Hız
SP-1	Hemen Kullanım Performans Seviyesi
SP-2	Kontrol Edilebilir Hasar performans Aralığı
SP-3	Can Güvenliği Performans Seviyesi
SP-4	Sınırlı güvenlik Performans Aralığı
SP-5	Yapısal Stabilitate Performans Seviyesi
SP-6	Hasarın Göz Önüne Alınmadığı Performans Seviyesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mafsal özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyici.....	2
Şekil 1.2. Adas aleti	4
Şekil 1. 3. Tadas elemanı	5
Şekil 1. 4. E ve C şekilli sönümleyiciler	5
Şekil 1.5. Yuvarlak delikli ve X şekilli sönümleyici	6
Şekil 1.6. Çaprazlar arasına yerleştirilen akma tipi sönümleyici (Tyler)	6
Şekil 1.7. Çapraz sisteme yerleştirilen Ciampi ve Samualli- Ferretti akma tipi sönümleyici	7
Şekil 1.8. 8 parçalı çok yönlü sönümleme aracı.....	8
Şekil 1. 9. Konik olmayan konsol sönümleme elemanı	8
Şekil 1.10. 8 adet U şekilli plakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş U şekilli kelepçe aleti	9
Şekil 1.11.Sarmal yay sistemli elostoplastik sönümleyici	9
Şekil 1.12.U şekilli çelik sönümleyici	9
Şekil 1.13. Pall sürtünme tipi sönümleyici	11
Şekil 1.14. Pall tipi sönümleyici tipik birleşim detayı	12
Şekil 1.15. FDD sönümleme aracı	13
Şekil 1.16. FDD sisteminin çalışma prensibi	13
Şekil 1. 17. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici	14
Şekil 1. 18. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici detayı	14
Şekil 1. 19. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici tipik kuvvet- şekil değiştirme grafiği	15
Şekil 1. 20. Piezo elektrik sürtünme tipi sönümleyici	15
Şekil 1.21. Enerji kısıtlayıcı araç (EDR)	16
Şekil 1.22.Yeni model EDR cihazı	17
Şekil 1. 23. Daptech firması tarafından üretilen 500 ton kapasiteli sönümleyici	18
Şekil 1.24. Sürtünme pedleri yerleşimi	18
Şekil 1. 25. Sönümleyicinin F kuvveti karşısında uzayıp kısılması	19
Şekil 1.26. Yatay Yük karşısında damptech sönümleyici davranışı	20
Şekil 1.27. Damptech 500 ton kapasiteli sönümleyicinin 30-45 mm deplasman grafiği	20
Şekil 1.28. Silindirik sürtünme tipi sönümleyici	21
Şekil 29. Sürtünme ve akma özelliğine sahip hibrit sönümleyici	21
Şekil 1.30. Viskoz akışkanlı sönümleyici boy kesidi.....	22
Şekil 1.31. Viskoelastik sönümleyici	23
Şekil 1.32. Aktif kontrollü sönümleyicilerin şematik diyagramı	24
Şekil 1.33. Aktif kütle sönümleyicilerin kullanıldığı Kyobashi Seiva binası tasarımı (Tokyo-Japonya)	24
Şekil 1.34. Yarı aktif kontrollü sistem şematik diyagramı	25
Şekil 1.35. Yarı aktif kontrollü sönümleyici	25
Şekil 2.1. Tek serbestlik dereceli sönümlü sistem	31

Şekil 2.2. Sönümlü Sistem serbest titreşim hareketi	32
Şekil 2.3. Sönüm salınımları	33
Şekil 2.4. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için eşdeğer ek sönüm hesap modeli	34
Şekil 2.5. Harmonik titreşimin bir çevrimi için E_D ve E_S	35
Şekil 2.6. Sürtünme tipi sönümleyicilerin farklı deprem seviyeleri için davranışı ...	37
Şekil 2.7. Amontos Coulomb'un sürtünme modeli	41
Şekil 2.8. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları	43
Şekil 2.9. Altı yüzlü eleman	44
Şekil 3.1. Coulomb sürtünme modeli	51
Şekil 3.2. Coulomb sürtünme modelinde değişik yaklaşımlar	52
Şekil 3.3. Farklı RVCNST değerleri için yaklaşık adım fonksiyonu.....	53
Şekil 3.4. Değiştirilmiş adım fonksiyonu sürtünme parametreler	55
Şekil 3.5. Mafsallı özellikli Sürtünme tipi Sismik sönümleyicinin üç boyutlu katı modeli.....	55
Şekil 3.6. Sönümleyici mesh görüntüsü.....	56
Şekil 3.7. Sonlu elemanlarda mesh çeşitleri	56
Şekil 3.8. Yakınsaklık analizi grafiği.....	57
Şekil 3.9. 300 kN 'luk yük altında gövde ve çelik elemanlarda oluşan von mises gerilme dağılımları.....	58
Şekil 3.10. 110 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği.....	60
Şekil 3.11. 154 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği.....	61
Şekil 3.12. 220 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği	62
Şekil 3.13. 286 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği.....	63
Şekil 3.14. 396 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği.....	64
Şekil 3.15. Ön-germe yükü- reaksiyon kuvveti grafik gösterimi.....	65
Şekil 4.1. Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici	66
Şekil 4.2. Çekme testi için numune boyutları	68
Şekil 4.3. Çekme deneyi.....	68
Şekil 4.4. Çekme deneyi akma gerilmesi- % uzama ilişkisi	69
Şekil 4.5. Sürtünme pedlerinin yük altında davranışı	70
Şekil 4.6. Saplama gerdirmeye elamanlarına ait von mises gerilme dağılımı.....	71
Şekil 4.7. Reaksiyon duvarı	72
Şekil 4.8. Saplama gerdirmeye seti.....	72
Şekil 4.9. Saplama gerdirmeye seti- sönümleyici bağlantısı	73
Şekil 4.10. Deney seti.....	74
Şekil 4.11. Testbox cihazı kurulum şeması	75
Şekil 4.12. Sönümleyicinin farklı periyotlar altında çalıştırılması ile oluşan deplasman- zaman grafiği	79
Şekil 4.13. Farklı frekanslar altında sönümleyici kuvvet- deplasman ilişkisi grafiği	80
Şekil 5.1. Düzce kuzey- güney deprem kayıtları	81
Şekil 5.2. Sönüm sistemli yapı.....	82
Şekil 5.3. Wen plastik özelliği için parametrelerin gösterimi	83
Şekil 5.4. 160 kN kapasiteli sönümleyici grafiği (kN/mm)	84

Şekil 5.5. Sönümleyicili ve sönümleyicisiz yapıların çatı deplasmanlarının kıyaslanması.....	84
Şekil 5.6. Kesit hasar bölgeleri	88
Şekil 5.7. Performans analizi yapılan yapıya ait kat planları.....	90
Şekil 5.8. Sönümleyici cihaz kullanılmayan yapı için yükleme durumu.....	91
Şekil 5.9. Sönümleyici cihaz kullanılmayan yapıda plastik mafsalları tanımlanması.....	92
Şekil 5.10. Sönümleyici kullanılmayan yapıda performans durumu	93
Şekil 5.11. Sönümleme sistemi kullanılmayan yapının taşıyabileceği maksimum taban kesme kuvveti grafiği	94
Şekil 5.12. Sönümleme sistemli yapı	95
Şekil 5.13. Sönümleyici, 160 kN kayma kapasitesi için deney sonrası elde edilen histerik grafik	96
Şekil 5.14. Sönümleyici cihaz kullanılan yapıda plastik mafsalları tanımlanması	96
Şekil 5.15. Sönümleyici kullanılan yapıda performans durumu	97
Şekil 5.16. Sönümleme sistemi kullanılan yapının taşıyabileceği maksimum taban kesme kuvveti grafiği.....	98
Şekil 6.1. Deney ve teorik çalışmalardan elde edilen beton ön-germe-deplasman ilişkilerinin kıyaslanması	100

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3. 1. Sürtünme pedi mekanik özellikleri	58
Tablo 3. 2. 110 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları	60
Tablo 3. 3. 254 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları	61
Tablo 3. 4. 220 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları	62
Tablo 3. 5. 286 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları	63
Tablo 3. 6. 396 Kn ön-germe kuvveti uygulama koşullar.....	64
Tablo 3. 7. Saplama öngerme -Reaksiyon kuvveti	65
 Tablo 4. 1. AISI4140 Çeliği kimyasal birleşimleri	 67
Tablo 4. 2. Basınç-kuvvet dönüşüm tablosu	74
Tablo 4. 3. Deneylerden elde edilen, saplama ön germe- deplasman ilişkisi	76
 Tablo 5. 1. Yapı performans seviyeleri	 86
Tablo 5. 2. Yapısal Performans seviyeleri ve aralıkları	87
Tablo 5. 3. Yapısal olmayan performans seviyeleri	88
Tablo 5. 4. Deprem Etkisi Parametreleri	89
Tablo 5. 5. Sönümleme sistemi kullanılmayan yapı elemanlarının hasar durumları	94
Tablo 5. 6. Sönümleme sistemi kullanılan yapı için hasar durumları tablosu	98

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Gökhan ALTINTAŞ hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Hazırlanan tez çalışmasının her aşamasında büyük katkısı olan, deneyim, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım; Sayın Doç.Dr. Erkan DOĞAN, sayın Doç.Dr. Ayhan NUHOĞLU'na desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için TÜBİTAK 1512 programı Sermaye desteği kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a, teşekkürlerimi sunuyorum.

Öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Recep SUK
Manisa, 2019

ÖZET

Doktora Tezi

Mafsallık Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyici

Recep SUK

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan ALTINTAŞ

Bu tez çalışmasında, depremin yıkıcı etkisinden dolayı yaşanan can kayıplarını, yapısal hasarları ve mali zararları en aza indirmek amacıyla geliştirilen, yeni tip çok yönlü sürtünme tipi sismik sönümleyici cihazın performansı, teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Tasarımı yapılan sönümleyici cihazın ilk olarak sonlu elemanlar modeli oluşturuldu ve model üzerinde yakınsaklık analizi yapılarak en uygun mesh elemanı sayısı elde edildi. Cihaz üzerinde yer alan saplama elemanlarına farklı büyüklüklerde ön germe kuvvetleri verilerek, her bir yükleme durumu için reaksiyon kuvveti – deplasman grafikleri elde edildi. Sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan çalışmalar sonrası elde edilen grafiklerin histerik olduğu görüldü. Deneyler öncesi, sönümleyici cihazda kullanılabilecek çelik malzemelerin seçimi sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen gerilmeler baz alınarak yapıldı. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği yapı laboratuvarında yer alan yükleme çerçevesi kullanılarak, farklı ön germe yüklerinde sıkıştırılmış sönümleyici cihaza farklı hızlarda toplam 5 adet itme ve çekme deneyi yapıldı. Deneyler sonrasında reaksiyon kuvveti – deplasman grafiklerinin farklı frekanslarda aynı davranışı gösterdiği tespit edildi. Sonlu elemanlar ve deneyler sonrasında elde edilen saplama ön germe-reaksiyon kuvveti grafiklerinin %93,87 oranında benzer olduğu görüldü. Sönümleyicinin yapı üzerindeki davranışını görmek üzere, sönümleyici cihaz kullanılan ve kullanılmayan iki özdeş yapı analiz edilerek yapılara ait çatı deplasmanları ve periyotları kıyaslandı. Yapılarda oluşan hasar düzeyleri itme analizi (Pushover) yapılarak kıyaslandı. Sönümleyici cihazın yapı periyot ve deplasmanlarını düşürdüğü, yapı performansını kayda değer şekilde arttırdığı belirlendi.

Yapılan çalışma sonrasında, Mafsallık özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyicinin deprem sonrası yapı davranışlarının kontrol edilmesinde etkili bir cihaz olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme, Sönüm, Performans analizi, Deprem, Sonlu elemanlar metodu.

2019, 107 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Joint Featured Friction Type Seismic Damper

Recep SUK

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan ALTINTAŞ

In this thesis study, the performance of the new type of multi directional friction seismic damping device, which was developed to minimize loss of life, structural damage and financial loss caused by the devastating impact of the earthquake, was determined by using theoretical and experimental methods.

Firstly, the finite element model of the designed damper device was created, and convergence analysis was performed on the model to obtain the optimal number of mesh elements. Reaction force - displacement graphs were obtained for each loading situation by giving prestressing forces of different magnitudes to the bolt elements on the device. After the studies on the finite element model, the graph obtained was found to be hysterical. Before the experiments, the selection of the steel materials used in the damping device was made based on the stresses obtained from the finite element analysis. A total of 5 push and pull tests were carried out at different speeds to the compressed damping device at different prestress loads by using the loading frame in Ege University Civil Engineering construction laboratory. After the experiments, reaction - displacement graphs showed the same behavior at different frequencies. It was seen that the bolt prestress-reaction force graphs obtained after finite elements and experiments were similar in 93.87%. In order to see the behavior of the damper on the structure, two identical structures with and without damping devices were analyzed and the roof displacements and periods of the structures were compared. Damage levels in the structures were compared by pushover analysis. It was determined that the damper device decreased the period and displacement levels and significantly increased the building performance.

As a result of this study, Joint featured friction type seismic damper can be said to be an effective device for controlling the structure behavior after earthquake.

Keywords: Friction, Damping, Performance analysis, Earthquake, Finite element method.

2019, 107 pages



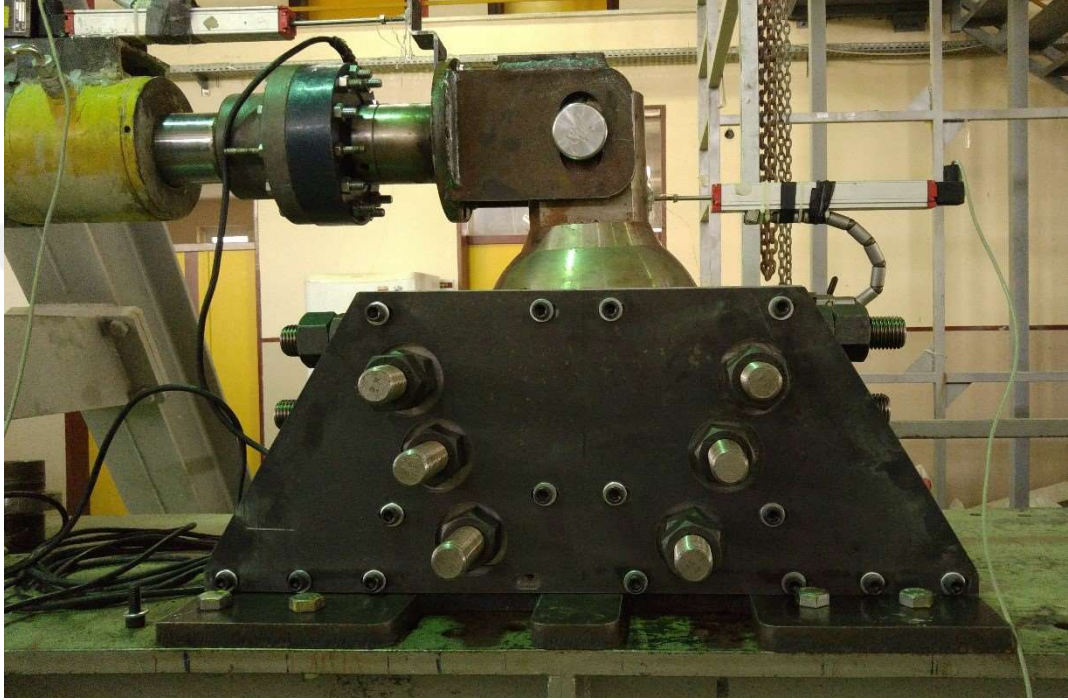
1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze Dünya üzerinde sayısız yıkıcı deprem olmuştur [1]. Depremler sırasında, büyük miktarda enerji yapıya geçmektedir [2]. Bu enerji yapıda çeşitli büyüklüklerde hasara sebep olabilmektedir. Türkiye dahil pek çok ülkenin deprem yönetmeliği, yapıların orta şiddetli depremlerde önemli derece hasar almadan büyük depremlerde ise göçmeden ayakta kalabilmesi üzerine tasarlanmıştır [3]. Yapı tasarımında asıl amaç can güvenliğidir. Genel olarak yapıların enerji yutarak ayakta kalabilmeleri için yapı sünek olarak inşa edilirken her şeye rağmen oluşabilecek elastik ötesi davranışlar yapılarda büyük deformasyonlara, eğilmelere, burulmalara ve çatlaklara sebep olmaktadır. Hasar alan yapıların onarımı, göçen binaların maliyetleri kadar olabilmektedir. Örneğin, 1994 Northridge (Kalifornia) ve 1995 Kobe (Japonya) depremlerinde, 5000'den fazla insan ölmüş, 30 bin kişi ciddi şekilde yaralanmıştır ve 300.000'den fazla kişi evsiz kalmıştır. Binaların göçmesi ve diğer masraflarla beraber hesaplanan miktar 150 milyar dolardan daha fazladır. Depremler açıkça göstermektedir ki, geleneksel yapı modeli ve teknoloji can ve mal kayıplarını önlemekte yeteri kadar etkili olamamaktadır [4].

Büyük depremlerin analiz sonuçları göstermektedir ki, depreme dayanıklı yapı tasarımı gereksinimleri tamamen karşılanmasına rağmen yapıların birçoğu ciddi hasarlar almaktadır. Bu sismik etkinin ön görülemeyen özelliklerine ve kompleks yapısıyla ilişkilidir. Deprem spektrumları geniş çeşitliliğe sahiptir, bu sebepten dolayı mühendis bina tasarımında sadece depreme dayanıklı yapı tasarımı genel prensiplerini değil aynı zamanda binanın sismik etkiye uyumu için mümkün olan en çok özel durumda düşünülmelidir. Bu amaçla sismik koruma için binalara mekanik enerjiyi başka enerji formlarına dönüştürebilen ek parçalar ilave edilmektedir. Örneğin kuru sürtünme damperleri, sönümleyici parçalar olarak kullanılabilir [5].

Sismik iyileştirme ve kontrol konusu on yedinci yüzyıla dayanmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarla deprem, makine, rüzgâr ve benzeri etkiler altında sismik koruma teorileri konusunda büyük gelişmeler kaydedilmiştir [6]. Sismik sönümleme sistemleri üzerine günümüzde de pek çok çalışma yürütülmektedir.

Bu çalışma ile, yıkıcı depremlerin sebep olduğu can kayıplarını, yıkımları ve maliyeti en az seviyeye indirecek hem mevcut hem de yeni binalarda kullanılabilecek şekil 1.1’de görülen yeni tip mafsal özellikli sürtünme tipi bir sismik sönümleyicinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Benzer çalışmalara ilave olarak çok yönlü sönümleme kapasitesine sahip olacak şekilde dizayn edilen sönümleyicinin saplama ön germe kuvvetleri değiştirilerek farklı kapasitelerde çalışması hedeflenmektedir.



Şekil 1.1. Mafsal özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici

1.1. Sönümleyiciler Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Büyük depremler ve rüzgarlar gibi dinamik yüklerin şiddetini önceden tahmin etmek çok zordur. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve yazılımlar sayesinde günümüzde yapıların 3 boyutlu simülasyonları ve hesapları yapılabilmektedir. Bu şekilde yapıların tasarım yükleri karşısındaki davranışları tahmin edilmeye çalışılmaktadır.

Geleneksel yapılarda deprem, rüzgâr gibi yatay kuvvetlerin oluşturduğu enerji, yapı içerisinde oluşturulan plastik mafsallar aracılığı ile sönümlenmeye çalışılmaktadır [7]. Bu durum yapının hasar almasına diğer bir deyişle yapının hasar alarak enerji yutmasına sebep olmaktadır.

Depremi yapılarada oluşturduğu hasarı en aza indirmek için geçmişten günümüze pek çok sönümleyici sistemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Sönümleme sistemleri ile yeni yapılacak ve güçlendirilmek istenen yapılarada can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Dinamik yüklere karşı sismik sönümleme sistemleri üzerine yapılan çalışmalar aktif, yarı aktif ve pasif sistemler olmak üzere üç grupta incelenebilir [7]. Aktif kontrol sistemleri, yapı kontrol kuvveti sağlayan elektro mekanik veya elektro hidrolik yük uygulayıcıların çalışması için büyük miktarlarda güce ihtiyaç duyan sistemler olarak tanımlanabilir [8]. Kontrol kuvvetlerinin hesaplanabilmesi için yapıya yerleştirilen sensörlerden elde edilen veriler kullanılır.

Yarı aktif sönümleme sistemleri tipik olarak yapı hareketlerinden faydalanılarak kontrol kuvveti geliştiren harici küçük enerji kaynakları vasıtasıyla çalışan sönümleme sistemi olarak tanımlanabilir. Kontrol kuvveti davranışları, yapının dinamik yük karşısındaki tepkisini ölçen sensörler tarafından elde edilir [8].

Pasif kontrol sistemlerinde enerji, sönümleyici cihaz içerisinde snmlandığı için harici güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaz [8]. Pasif sönümleme sistemlerinde önceden belirlenen kayma yükü kapasiteleri değişken deprem kuvvetlerinin oluşturduğu farklı frekanslarda sürekli sabit kalmaktadır [9]. Bu tez çalışmasında pasif sistemler üzerine detaylı durulmaya çalışılmıştır.

1.1.1. Metal- Akma Prensibine Sahip Sönümleyiciler

Metal sönümleyiciler 1960 ve 1970’li yıllarda inşaat mühendisliği laboratuvarlarında yapılan çalışmalarla tanınmıştır. Çalışmalarda akma dayanımlarına dayalı enerji sönümleyiciler için değişik formlarda metaller test edilmiştir. Tasarlanan ilk elik türü 450 kN, 80mm kapasiteli burulma özellikli histerik sönümleyici Rangitikei köprüsünü güçlendirmek amaçlı kullanılmıştır [10].

1.1.1.1. Adas Metal Sönümleyiciler

Metal sönümleyiciler çapraz ervelerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bu tarz en iyi bilinen sönümleyici (Adas)’dır [10]. Pasif sönümleme sistemleri arasında yer alan metalik sönümleyiciler farklı şekillerde üretilmiş plakaların bir araya gelmesinden oluşur. Bu araçlar genellikle enerji yutma özelliği yüksek olan sünek ve

şekil değiştirme özelliklerine sahip yumuşak çelik malzemelerden üretilir. Metallerin plastik deformasyon yapma özelliği sayesinde deprem enerjisinin sönümlenmesi amaçlanır [11].

Adas elemanlarıyla güçlendirilen binalardan bir tanesi Mexico’da 1970 yılında inşa edilen zemin kat dahil 13 kattan oluşan Izazaga # 38-40 binasıdır. 1985 yılında yaşanan depremde hasar görünce perde duvar ilavesi gibi klasik yöntemlerle güçlendirilen bina 1989 yılında meydana gelen depremde tekrardan hasar görünce binanın tekrardan güçlendirilmesi için adas elemanları kullanılmıştır. Yapıya X ve Y yönlerinde yerleştirilen adas araçlarının yapı periyotlarını düşürdüğü görölmüştür [12]. Adas aleti şekil 1.2’de gösterilmiştir.



şekil 1.2. Adas aleti [10]

1.1.1.2. Tadas Metal Sönümleyiciler

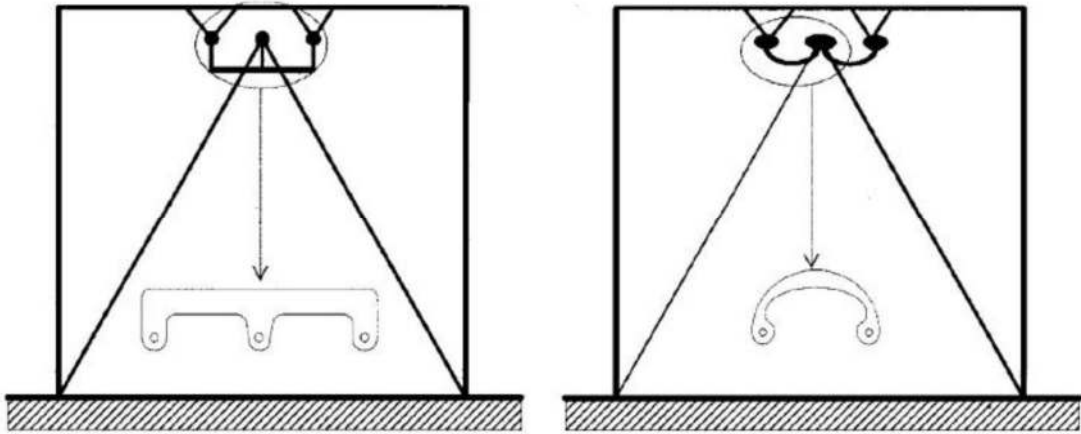
Üçken plaka şeklinde üretilen sönümleyici (Tadas) Tsai et al tarafından 1992-1993 yılları arsında geliştirilmiştir. Adas’ın bir versiyonudur. Tadas üçken plakaları bir plakaya kaynakla bağlanır ve üst kısmı kiriş elemana yerleştirilir. Başka bir tadas elemanı kirişe bağlanan Tadas elemanına mafsallı bir şekilde bağlanarak sistem tamamlanmış olur [10]. Tadas sönümleme aleti şekil 1.3’deki gibidir.



Şekil 1. 3. Tadas elemanı [10]

1.1.1.3. Diğer Metal Sönümleyiciler

Ciampi ve çalışma grubu tarafından, Chevron-type çaprazlı sistemler için E ve C şeklinde başka sönümleyici sistemler önerilmiştir. C şekilli elemanlar basitçe değişik kesitlerde kavislendirilmiş elemanlardır. Bu yüzden neredeyse tüm uzunluk boyunca uniform şekilde davranırlar [10]. Şekil 1.4’de elemanlar Ters V şekilli çapraz çerçeveye yerleştirilmiştir. Bu çaprazlar basınç ve çekme durumunda elastik şekilde reaksiyon verecek şekilde dizayn edilmiştir [10].



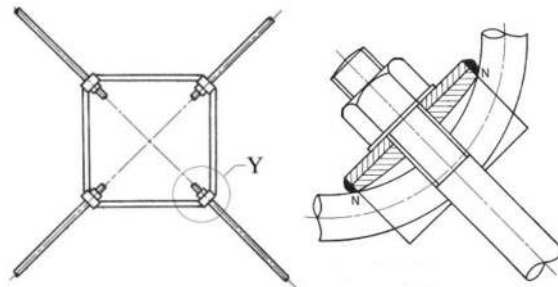
Şekil 1. 4. E ve C şekilli sönümleyiciler [10]

Şekil 1.5’de yuvarlak delikli ve X şekilli sönümleyiciler gösterilmiştir. Bu sistemler Lİ.H. N tarafından dizayn ve test edilmiştir. Bu iki çeşit aynı zamanda eğilme ve akma prensibine sahip metal sönümleyicilerdir [10].

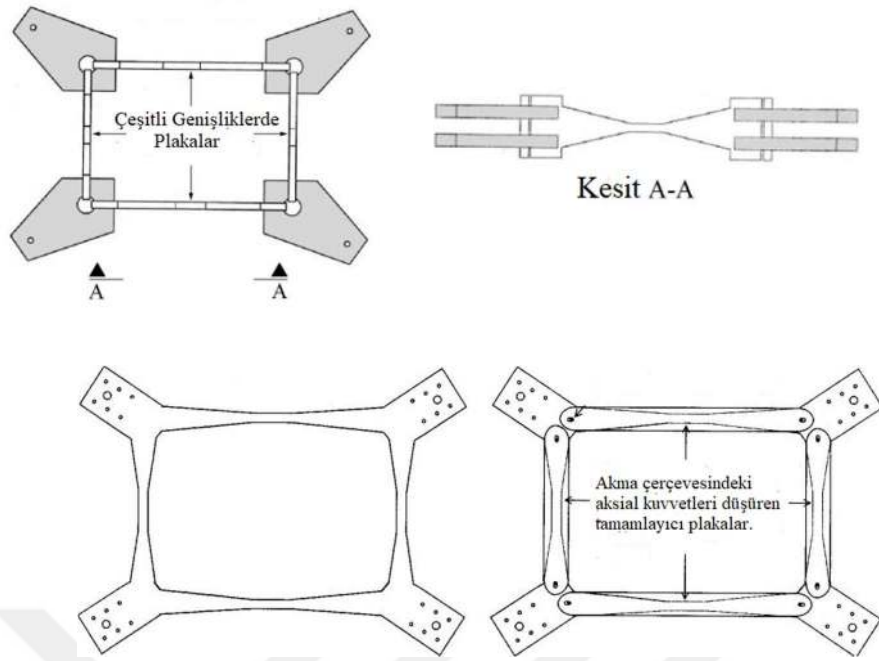


Şekil 1.5. Yuvarlak delikli ve X şekilli sönümleyici [10]

Çapraz çerçeve sistemlerinin ortasına yerleştirilmek üzere geliştirilmiş sönümleyicilerde geliştirilmiştir. Şekil 1.6 ve 1.7’de gösterilen iki sönümleme sistemi çapraz sistemin merkezine monte edilerek akma prensibine göre çalışan sönümleyicilerdir. Şekil 1.6’da gösterilen Samualli-Ferretti tipi sönümleyici basitçe metal çubuk kesitlerden oluşmaktadır. Dik dörtken çerçeveye çaprazlar tarafından uygulanan kuvvet çerçeveyi deformasyona uğratarak akmasına ve dolayısıyla enerji yayılımına sebep olmaktadır. Şekil 1.7’de gösterilen Ciampi ve Samualli-Ferretti tarafından geliştirilen sistem, çeşitli kesitlerdeki plakalardan yapılmış daha karmaşık bir sistemdir. Sistem plakaların uzunluğu boyunca akmaya yayar ve bu yüzden düşük şekil değiştirme ve çok daha az yorulma meydana gelir [10].



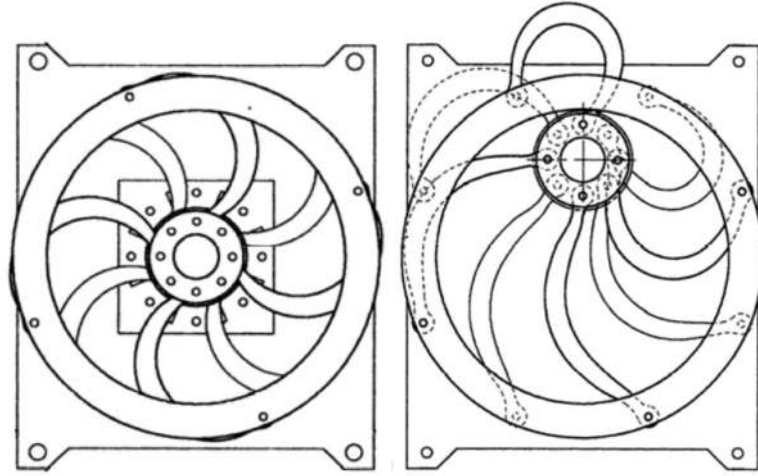
Şekil 1.6. Çaprazlar arasına yerleştirilen akma tipi sönümleyici (Tyler) [10]



Şekil 1.7. Çapraz sisteme yerleştirilen Ciampi ve Samualli- Ferretti akma tipi sönümleyici [10]

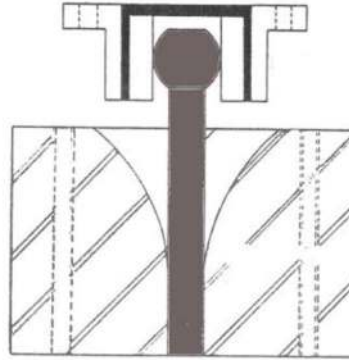
Köprülerde çok yönlü hareketlilik olduğu için tek yönde sönümleme yapan metal akma tipi sönümleyiciler uygun değildir. Bina türü yapılarda yatay yük aktarımı çerçeveler tarafından yapıldığı için tek yönde çalışan akma tipi sönümleyiciler kullanılabilir fakat burulmaya maruz yapılarda çerçevelerde meydana gelebilecek burulmalar sönümleyicilerin hasar görmesine ve sönümleme işleminin istenilen düzeyde yapılmasına sebep olabilir [10].

Köprüler için Ciampi et al tarafından geliştirilen 8 parçalı sönümleme aracı şekil 1.8’de gösterilmiştir.



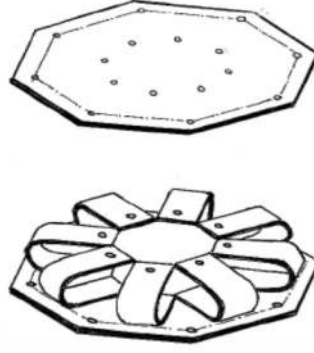
Şekil 1.8. 8 parçalı çok yönlü sönümleme aracı [10]

Şekil 1. 9’da gösterilen, Kelly tarafından geliştirilen konik olmayan prizmatik kesitli sönümleyici 1988 yılında Japonya’da kullanılmıştır [10].



Şekil 1. 9. Konik olmayan konsol sönümleme elemanı [10]

Şekil 1. 10’da gösterilen U şekilli kelepçe aleti 8 adet U şekilli plakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 1.10. 8 adet U şekilli plakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş U şekilli kelepçe aleti [10]

Japonya’da uygulanmış, sarmal yay şeklinde dizayn edilmiş elastoplastik sönümleyici şekil 1.11’de gösterilmiştir. Şekil .12’de U şekilli çelik sönümleyici yer almaktadır.



Şekil 1.11.Sarmal yay sistemli elastoplastik sönümleyici [10]



Şekil 1.12.U şekilli çelik sönümleyici [10]

1.1.2. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Sürtünme hayatın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Yapılarda sürtünme genelde duvar ve çerçeve arasında, dilatasyon derzlerinde karşımıza çıkmıştır [10]. Zamanla yapılarda sürtünme kuvvetinden nasıl faydalanılacağı düşünülmüş ve enerjiyi sönümleme aletleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Günümüze kadar yapılarda enerjiyi sönümleme amaçlı çeşitli sürtünme tipi sönümleme sistemleri geliştirilmiştir.

Bu sistemlerin avantaj ve genel özelliklerinden şöyle bahsedebiliriz: Pek çok sürtünme tipi sönümleyici çeşitli çapraz plakaların içine yerleştirilir ve ekstra alana ihtiyaç duymadıkları için duvarların arasına gizlenebilirler. Kontrol ve bakım gerektirmezler, hiçbir sismik aktivite olmadığında sönümleyicilerde hiçbir hareketlilik olmaz. Bu yüzden eskime ve yorulma problemi yaşanmaz. Yapı elemanlarına etkileyen kuvvetleri sınırlandırabilirler çünkü histerik döngü dikdörtgendir. Bu durum verilen kuvvet ve deplasmanda hız ve frekanstan bağımsız olarak maksimum enerji sönümünü sağlar. Her bir sönümleyici belirli bir kuvvetle hareket edecek şekilde üretilir. Hareket kuvveti sistemini bir arada tutan blonlar tarafından kontrol edilebilir [9,13]. Performans süreklidir ve yeniden kullanılabilir, bakım olmaksızın deprem serilerine karşı koruma sağlarlar [13].

Sürtünmeli frenler etkili, güvenilir ve enerji yayılımı için ekonomik oldukları için sürtünen yüzeylerden kinetik enerji çıkarmak için yaygın bir şekilde kullanılırlar. Frenleme esnasında hareketli kütlelerin kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüşür [14]. Yüzyıllardır makine mühendisleri bu sistemi makine ve otomobillerde hareket kontrolü için başarılı bir şekilde kullanmışlardır.

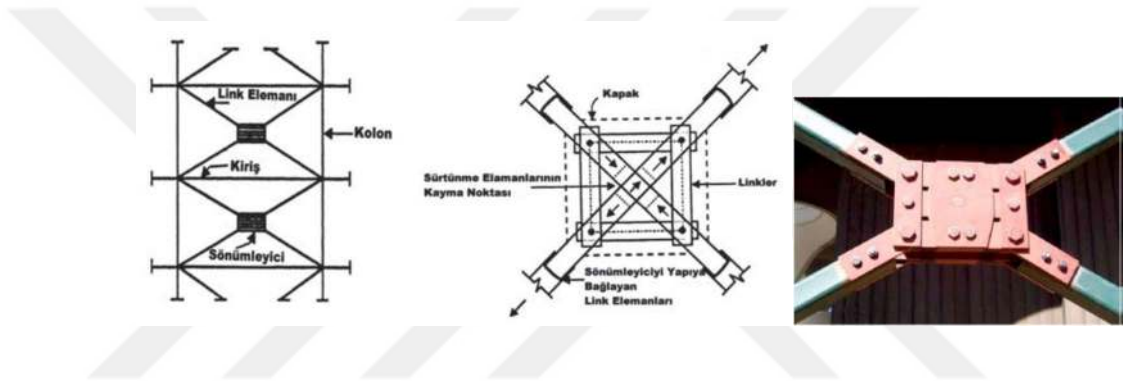
1.1.2.1. Pall Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Sürtünmeli fren prensibi Pall sürtünme sönümleyicilerine ilham vermiştir. Pall Sönümleyicileri aşağıda sıralanan yapılar için uygundur.

- 1- Betonarme perdeler ve prekast yapılar
- 2- Çaprazlı çelik veya betonarme yapılar
- 3- Yüksek veya alçak binalar

Pall sürtünme tipi sönümleyiciler basitçe en güvenli sürtünme için özel olarak iyiletirilmi elik plakalar serisinden oluşur. Bu plakalar yüksek dayanımlı blonlarla birbirine bağlanır ve önceden belirlenmiş yüklerde kaymasına izin verilir [4].

Sürtünme tipi sönümleyiciler, rüzgâr veya orta şiddetli depremlerde kaymaları için tasarlanmılardır. Şiddetli depremler sırasında sürtünme tipi sönümleyiciler sismik enerji ile yapı elemanlarında akma veya hasar oluşmadan belirlenmiş yükler altında kayarlar. Bu binanın elastik kalmasına veya en azından felaket denecek durumlar sırasında akmanın gecikmesine sebep olur. Uygun kayma yükü seçilerek yapının tepkisini hesaplamak mümkündür [4]. Pall sürtünme tipi sönümleyici ve ereve içerisindeki yerleşimine ait şematik görüntüler ekil 1.13’de verilmiştir.



Şekil 1.13. Pall sürtünme tipi sönümleyici [7,15]

Kanada’nın Montreal şehrinde 1928’de inşa edilen 10 katlı MUCTC binası önemli tarihi miraslardan biridir. 2000 yılında bitiiğine ‘palais des Conges’ binası yapılarak geniletilmeye karar verildi. MUCTC binası ile ilintili olan ek bina MUCTC binasında sismik probleme sebep olmuştur. Betonarme perde duvarlar, rijit elik çaprazlar gibi geleneksel sismik iyileştirme yöntemleri MUCTC binası için uygun olmadığı için ekil 1.14 ‘de gösterilen elik aprazlı Pall sürtünme damperleri kullanılmıştır [16].



Şekil 1.14. Pall tipi sönümleyici tipik birleşim detayı [16]

1.1.2.2. F.D.D Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

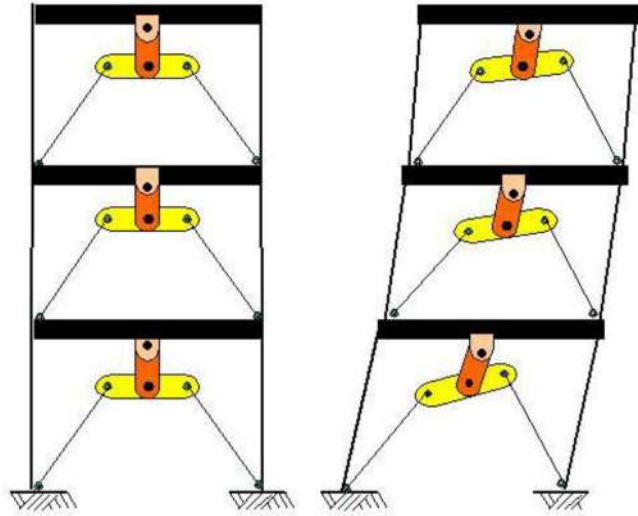
Bir diğer sürtünme tipi sönümleyici çeşidi I.H. Mualla tarafından geliştirilen Friction Damper Device (FDD)'dir. Bu sistem moment aktarabilen çerçeveler için uygundur. Sistem çapraz ve paneller gibi yardımcı elemanların bir araya getirilip tüm katlara yerleştirilmesinden oluşur. 1/3 oranında Sönümleyici prototipi üzerine Thecnical Universty Denmark (DTU)'da kapsamlı testler yapılmış ve sürtünme pedleri seçimi yapılmıştır. Ancak, sönümleyicinin tüm performansının belirlenebilmesi için daha fazla teste ihtiyaç duyulmuştur. 2001 yılında Tayvan'ın uluslararası deprem araştırma merkezi (NCEER)'de 3 katlı bir yapı FDD sistemiyle donatılmış ve test edilmiştir [17].

Şekil 1. 15'de gösterilen Sönümleyici 3 metal parçadan ve parçaları bir arada tutmaya yarayan ön germeli bir blondan oluşmaktadır. Metal plakalar arasına 2 adet dairesel sürtünme pedi yerleştirilmiştir. Kuvvetin sabitlenmesi için birkaç adet yaylı rondela kullanılmıştır. Ortadaki düşey plaka sönümleme sistemiyle kiriş arasında bağlantıyı sağlamaktadır. Köşe plakalar çapraz sistemi destekleyen bağlantı uçlarına bağlıdır. Sistemde ters v şekilli çapraz yerleştirme kullanılmaktadır. Çapraz elemanları burulmayı önlemek için ön germelidir [17].



Şekil 1.15. FDD sönümleme aracı [17]

Yer sarsıntısı yaşandığında veya yapıya dış yatay yükler etkiğinde her bir katta oluşan hareket sönümleyicide şekil 1.16 ‘da görüldüğü gibi dönme oluşturur. Bu hareket karşısında sürtünme kuvvetleri tarafından direnç oluşur. Sönümleyicide oluşan kayma ve rölatif dönme yapıda kinetik enerji sönümüne sebep olmaktadır [17].

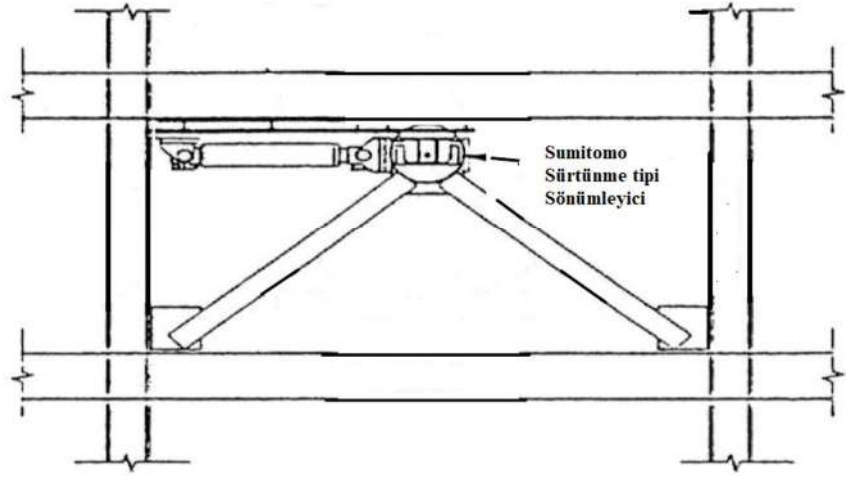


Şekil 1.16. FDD sisteminin çalışma prensibi[17]

1.1.2.3. Sumitomo Pasif Enerji Yayma Sistemleri

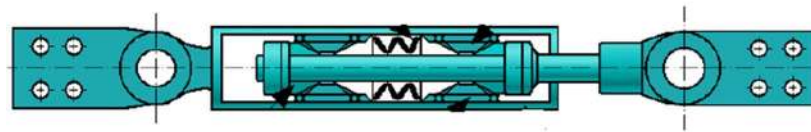
Bu cihaz ilk olarak Sumimoto metal endüstrisi tarafından demir yollarında şok emici olarak tasarlanmıştır. Fakat daha sonra Japon araştırmacılar bu cihazı inşaat mühendisliğinde sürtünme tipi sönümleyici olarak kullanılabilmesi için geliştirmişlerdir. Sistem Tokyo’da yer alan Sonic city binalarına ve Asahi Beer

Azumabashi binalarına uygulanmıştır. Deprem araştırma merkezlerinde pasif enerji sönümleyici olarak testleri yapılmıştır. Bu sistem kiriş altına paralel olarak yerleştirilir, bir ucu kirişe diğer ucu ters v şekilli çaprazlara bağlanır. Şekil 1. 17 ‘de sumitomo sürtünme tipi sönümleyiciye ait yerleşim planı gösterilmiştir [15].



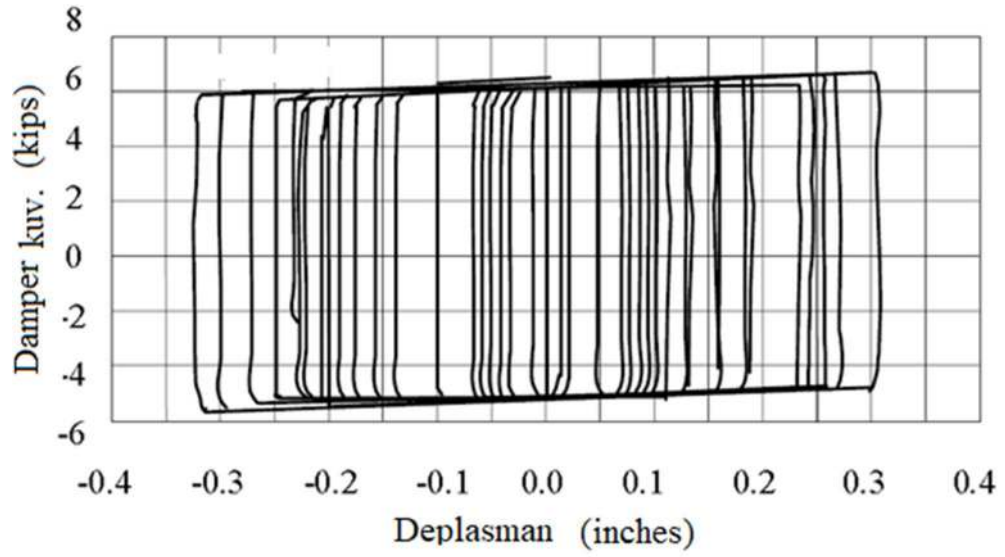
Şekil 1. 17. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici [15]

Hareket sistemi bronz ve bakır karışımından oluşan sürtünme sistemine dayanır. Sürtünme yüzeyi hareketi şekil 1.18’de gösterildiği gibi kamanın pozisyonu ve yay hareketi tarafından belirlenir.



Şekil 1. 18. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici detayı [15]

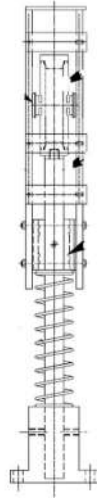
Sönümleyicinin ilk sayısal ve deneysel çalışmaları Aiken ve Kelly tarafından 1990 yılında yapılmıştır. Deneyler için 1/25 ölçeğinde 9 katlı çelik bir yapı kullanılmıştır. Deneylerde Sumitomo sönümleyicilerin sismik etkileri düşürmede iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Şekil 1.19 ‘da Sumitomo sürtünme tipi sönümleyiciye ait tipik bir kuvvet şekil değiştirme grafiği verilmiştir [15].



Şekil 1. 19. Sumitomo sürtünme tipi sönümleyici tipik kuvvet-şekil değiştirme grafiği [15]

1.1.2.4. Piezo elektrik Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Piezo elektrik sürtünme tipi sönümleyiciler şekil 1.20’de gösterildiği gibi çeşitli aktif ve pasif parçalardan oluşmaktadır [15].



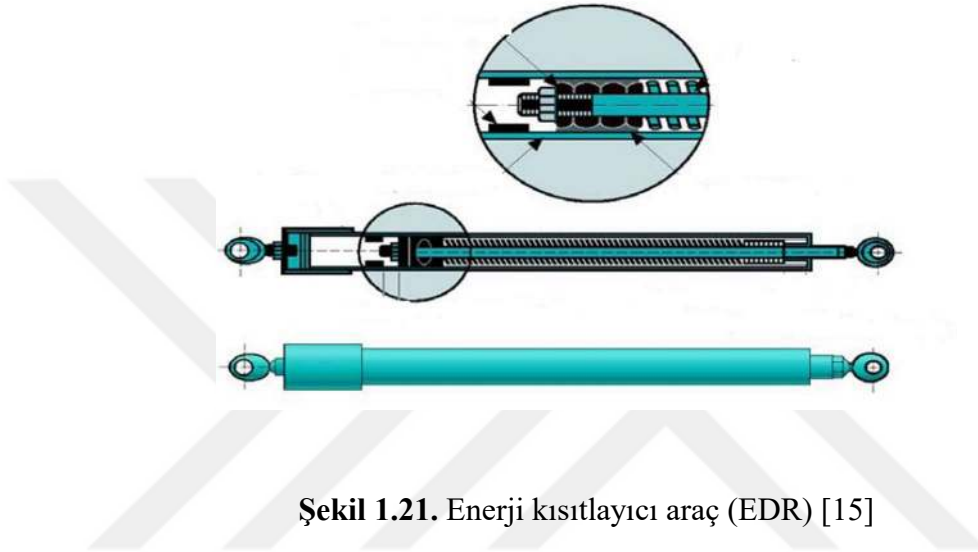
Şekil 1. 20. Piezo elektrik sürtünme tipi sönümleyici [15]

Şaft altta hareketsizdir ve mekanik parçalar şafta tutturulmuştur. Hareketli parça dış yuva ve havalı yataktan oluşur. Dış yuva ve havalı yatak adı verilen dış parçalar sistemin hareket etmesine olanak sağlar. Dış yuva alt parçaya bir yay vasıtasıyla

tutturulmuştur. Sistem bir sismik etkiyle karşılaştığında sürtünme pedlerinin yüzeyi ile havalı yatak birbirine bağlanır ve sistem gelen enerjiyi yutar [15].

1.1.2.5. Enerji Yayılımı Kısıtlayıcı Araçları (EDR)

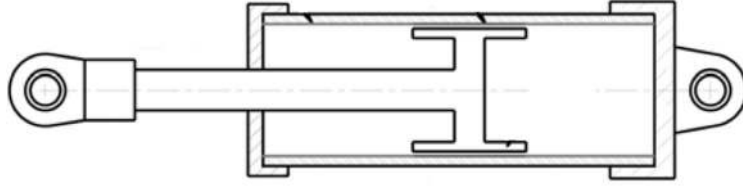
Enerji yayılımı kısıtlayıcı araçlar (EDR) Flour Daniel şirketi tarafından ticari bir marka olarak üretilmiştir [15]. Sistemin basit bir görünümü şekil 1.21’de gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Enerji kısıtlayıcı araç (EDR) [15]

EDR cihazları Nükleer santraller içerisindeki tüp sistemlerin yer hareketlerinden korunması amacıyla dizayn edilmiştir. EDR araçları içinde bulunan yay sistemi, takoz ve pedleriyle bakıldığında Sumitomo sistemlerine çok benzerdir. Yaylar boyunca harekete geçmiş olan kuvvet takozların içindeki silindirik duvarlar boyunca normal bir kuvvete döndükleri için sürtünme kuvvetinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. EDR’nin etkinliği açısından, sismik hareketlilik sırasında yatay yük karşısında elde edilen sürtünme yeterli değildir [15].

Yeni EDR aracı içindeki bazı parçalar kayar şaft ve sürtünme yüzükleri ile şekil 1.22’deki gibi değiştirilmiştir. Zhou ve Peng (2009) EDR’nin performansını belirlemek için teorik çalışmalar yapmışlardır. Deprem yükleri altında ERD cihazı takılmış 7 katlı bir bina analiz edilmiş ve analiz sonuçları yaklaşık olarak %60 oranında enerjinin sönmüldüğünü göstermiştir [15].



Şekil 1.22.Yeni model EDR cihazı [15]

1.1.2.6. Damptech Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

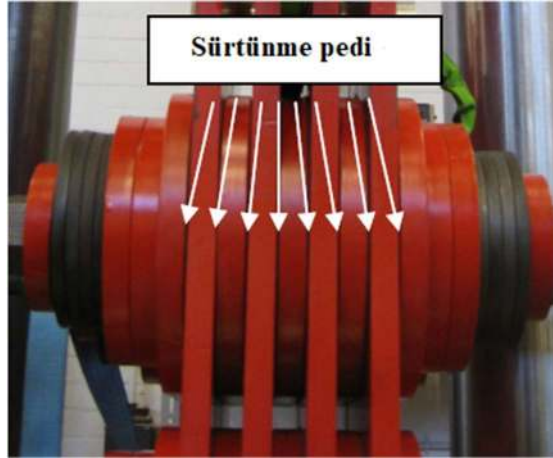
Damptech firması tarafından üretilen sönümleyiciler pek çok ülkede kullanılmaktadır. Firma 500 kN'dan 5000 kN'a kadar çeşitli kapasitelerde sönümleyici üretmektedir.

Üretilen sönümleyicilerin teknik özellikleri genel olarak, 25 mm kalınlığında birkaç plakanın üst üste konulup sıkıştırılmasından oluşur. Danimarka Teknik üniversitesinde şekil 1.23'de gösterilen damptech firması tarafından geliştirilen 5000 kN kapasiteli sönümleyici test edilmiştir [9].

Sönümleyicinin ana parçaları 8 uzun plaka ve 20 kısa plakadan oluşmaktadır. Uzun ve kısa parçalar birbirine özel mukavemetli M48 blonlarıyla tutturulmuştur. Uzun ve kısa parçalar arasına şekil 1.24'de gösterildiği gibi birkaç katman sürtünme pedleri yerleştirilmiştir. Sürtünme pedlerinin amacı kuru sürtünme yüzeyi oluşturmak, plakalar arasındaki kuvvet akışını dengelemek ve hareket sırasında oluşacak sesi düşürmek amaçlıdır [9].



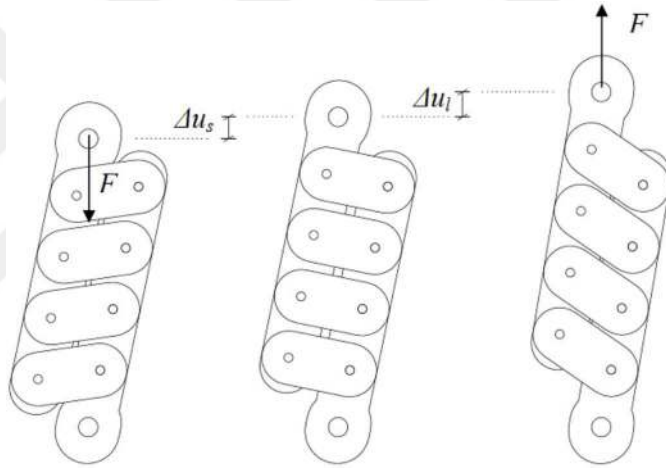
Şekil 1. 23. Daptech firması tarafından üretilen 500 ton kapasiteli sönümleyici [9]



Şekil 1.24. Sürtünme pedleri yerleşimi [9]

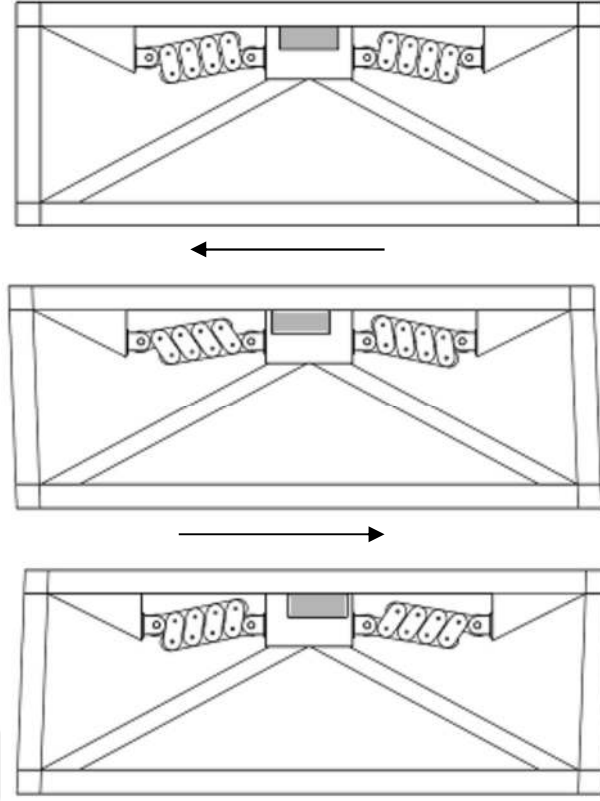
Sönümleyici temel olarak dönel sürtünme prensibine dayanmaktadır. Sistem harekette değilken uzun ve kısa plakalar birbirine dik durumdadır. Sönümleyici hareket ettiğinde kısa plakalar yükleme yönüne doğru blonlar etrafında döner bu şekilde sönümleyici uzama ve kısalma hareketleri yapar [9].

Blonlar 70 tona kadar olan yüksek kuvvetlerle sıkılarak plakalar ve sürtünme pedleri üzerinde büyük bir basınç oluşturulur böylece çelik plakalar ve sürtünme pedleri arasında büyük bir kuvvet elde edilir F , Eğer F kuvveti sönümleyicinin hareket edebileceği kuvvetten düşükse deplasman çok düşük olur ve sönümleyicide sönümleme olmaz. F kuvveti 5000 kN'a ulaştığı zaman kısa plakalar harekete başlar ve sönümleyici plastikleşerek enerji çıkışı olur. Şekil 1.25'de Sönümleyicide meydana gelen uzama ve kısaltmalar gösterilmiştir [9].



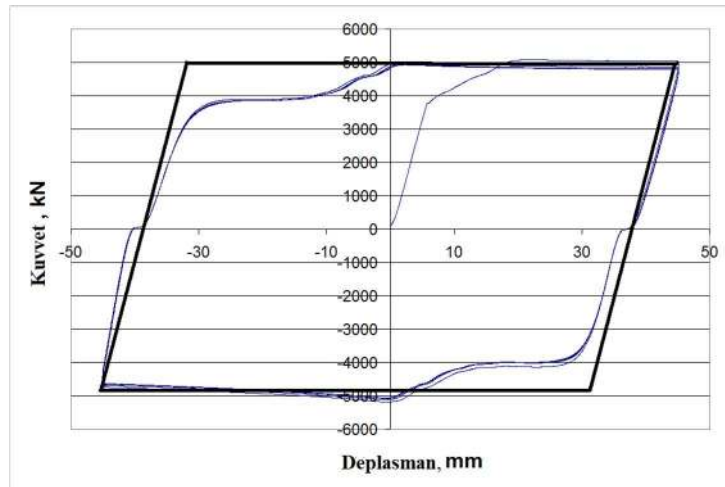
Şekil 1. 25. Sönümleyicinin F kuvveti karşısında uzayıp kısaltması [9]

Sönümleyici çerçeveye değişik şekillerde yerleştirilebilir. Şekil 1.26'da görüldüğü gibi dışardan gelen bir yatay yük karşısında çerçevenin üst kısmı yatay olarak harekete geçer, diyagonal sistem ve metal plakaların sürtünme yüzeyleri ile sürtünme pedleri arasında oluşan sürtünme kuvvetleri yatay harekete karşı koyarlar. Çerçeve sola gittiğinde sol sönümleyici uzarken sağ taraftaki sönümleyici kısalır bu şekilde her iki sönümleyici sönümleme işlemini gerçekleştirmiş olur. Benzer şekilde çerçeve sağa gidince sağ sönümleyici uzarken sol taraftaki kısalır. Böylece her iki tarafta birden sönümleme işlemi gerçekleştirilmiş olur [9].



Şekil 1.26. Yatay Yük karşısında damptech sönümleyici davranışı [9]

5000 kN kapasiteli sönümleyici Danimarka Teknik üniversitesinde, 0.005 Hz. frekansla yatayda 30-45 mm deplasman yapacak şekilde çekilmiş ve test sonucunda şekil 1.27'deki grafik elde edilmiştir. Deney sonuçları bu tarz sönümleyicilerin frekanstan bağımsız çalıştıklarını göstermiştir [9].



Şekil 1.27. Damptech 500 ton kapasiteli sönümleyicinin 30-45 mm deplasman grafiği [9]

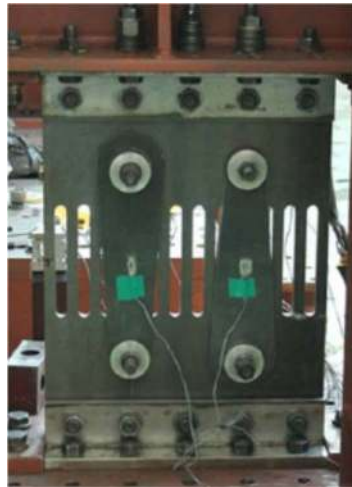
Sürtünme tipi sönümleme üzerine son yıllarda yapılmış diğer çalışmalara bakıldığında, 2011 yılında, masaud Mirtahaeri ve arkadaşları tarafından şekil 1.28 ‘de görülen silindirik sürtünme tipi sönümleyici üzerine çalışılmış ve cihazın enerji sönümlemede başarılı olduğu görülmüştür [18].



Şekil 1.28. Silindirik sürtünme tipi sönümleyici [18]

2015 yılında, döner sürtünme tipi bir sönümleyicinin yapı çatı deplasmanları üzerindeki etkisi araştırılmış ve çatı deplasmanlarını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür [19].

2017 yılında, şekil 1.29’da görülen hem akma hem de sürtünme özelliğine sahip hibrit sönümleyici üzerine çalışılmıştır. Sürtünme tipi sönümleyici küçük deprem yüklerinde ve kuvvetli rüzgarlarda akma plakaları ise kuvvetli depremlerde aktif olmaktadır [20].



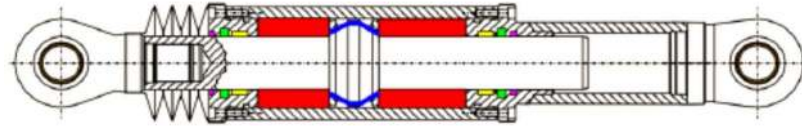
Şekil 29. Sürtünme ve akma özelliğine sahip hibrit sönümleyici [20]

1.1.3. Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler

Viskoz sönümleyicilerin temeli bir tüpün içerisine viskoz sıvının sıkıştırılması üzerine dayanmaktadır. Teori sıvı ve borunun yüzeyleri arasındaki etkileşimden dolayı oluşan ısı enerjisinin oluşturduğu sönüme dayanır. Mekanizmadaki reaksiyon kuvveti F , hızla (V) veya onun katsayılarıyla orantılıdır [10].

$$\alpha F = C.V \quad (1.1)$$

Denklem 1.1’de, C ve α sabittir. Hız katsayısının değeri α sönümleme aracının geometrik ve mekanik özelliklerine bağlıdır ve ayarlanabilir. α katsayısının düşmesi reaksiyon kuvvetinin hız üzerine bağımlılığını düşmesi anlamına gelir. Viskoz sönümleyicilerin tasarım konsepti hep aynı olduğu için denklem 1.1’in her zaman sağlanması garanti değildir. Sisteme etkiyen ikinci faktör tüp boyunca oluşan ısıdır. Bu yüzden, dizayn basit olsa da ortaya çıkan ekstra durumlar dizaynı karmaşık hale getirmektedir. Basınçtan kaynaklanan reaksiyon kuvvetlerinde istenmeyen çeşitli durumları sınırladığından dolayı güvenilirdir. Şekil 1.30’da boy kesiti verilen viskoz akışkanlı sönümleyici yüksek sıcaklıklarda sızmaya karşı bileşenleri yüksek performans gösterir bu yüzden, viskoz akışkan damperler pasif deprem koruma cihazları arasında en gelişmiş aletlerdir [10].



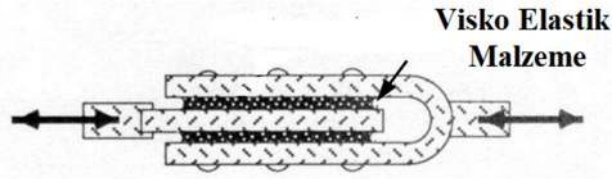
Şekil 1.30. Viskoz akışkanlı sönümleyici boy kesidi [10]

Viskoz akışkan, İçinde pistonun hareket ettiği bir silindir içine doldurulmuştur. Pistonun yüksek viskoziteli akışkan içerisinde hareketi neticesinde mekanik enerji ısı enerjisine dönüşür [7].

1.1.4. Viskoelastik Sönümleyiciler

Akrilik polimerler dahil olmak üzere bazı malzemeler, normal elastik tepkiye ek olarak viskoz yapıda (hıza bağlı) sönümleme davranışı gösterir. Bu malzemeler visko elastik damperler olarak bilinen bir sınıf damper sınıfının enerji dağıtan elemanları olarak kullanılırlar [10].

Şekil 1. 31’de görüldüğü gibi bu sönümleyiciler, visko elastik malzemelerin çelik plakalar etrafına sarılmasıyla oluşur. Plakaların hareketi visko elastik malzemedeki kesme gerilmelerini ortaya çıkarır. Sönümleyici yapıda deplasman olması beklenen iki nokta arasına diyagonaller vasıtasıyla karşılıklı iki plakayla tutturularak kullanılabilir. Visko elastik sönümleyiciler rüzgâr yüklerinin oluşturduğu sarsıntıya karşı kullanılmaktadır. Deprem yüklerine karşı performansı deneysel çalışmalarla araştırılmaktadır [10].



Şekil 1.31. Viskoelastik sönümleyici [10]

1.1.5. Aktif Sönümleyiciler

Aktif kontrol sistemleri, sensör, bilgisayar teknolojisi ve teknolojik ekipmanlar kullanılarak yapı hareketlerinin kontrol altında tutulduğu bir sönümlenme sistemidir. Sistemin yapıya uygulanma aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [21].

1- Dışarıdan gelecek olan dinamik yüklerin algılanması için yapıya sensörler yerleştirilir [21].

2-sensörlerden gelen bilgiler, belli algoritmalar vasıtasıyla hesaplanarak gerekli olan kontrol kuvvetleri hesaplanır [21].

3-Dışarıdan sağlanan güç ünitesi yardımıyla ihtiyaç duyulan kontrol kuvvetleri üretilir [21].

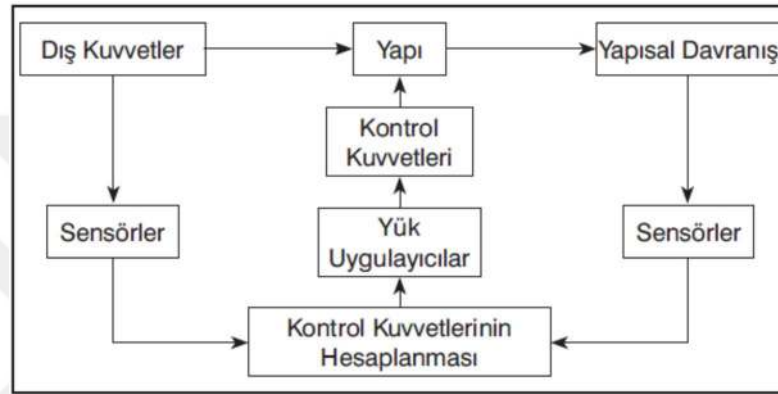
Sistemin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1-Malzeme ve yapı sistemlerinin gelişmesiyle yapılar daha yüksek ve sünek inşa edilebilmektedir. Aktif kontrol sistemleri bu tarz yapılarda meydana gelebilecek aşırı sarsıntıları sönümlemek için uygun sistemlerden biridir [21].

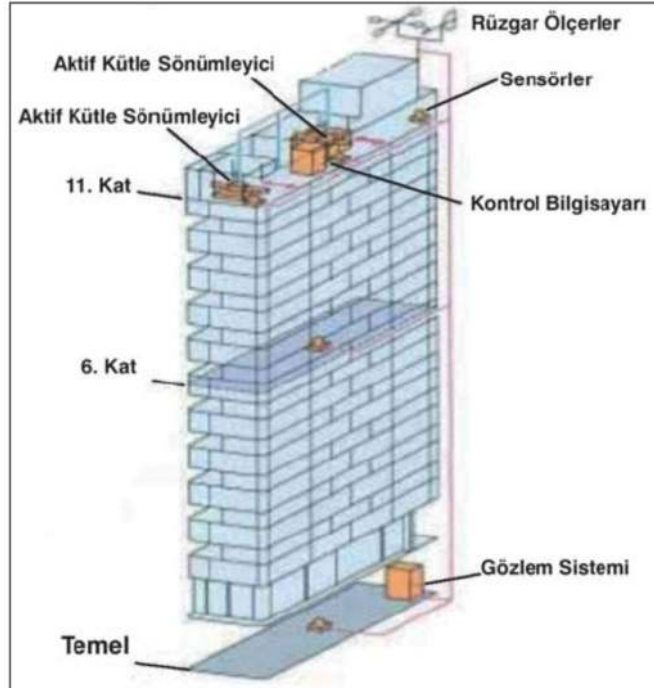
2- Mevcut yapıların güçlendirilmesinde aktif sistemler kullanılabilir [21].

3- Yapılar bütün dış yüklere karşı koyacak şekilde dizayn edilemezler. Yüklerin tasarlanan değerleri geçmesi durumunda hasar veya göçme yaşanabilir [21]. Yapıda oluşabilecek ilave yükleri kontrol altına alarak yapının ayakta kalmasını sağlayan aktif kontrol sistemlerine ait şematik diyagram şekil 1.32’de görülmektedir.

Bu teknoloji sayesinde, ilk olarak Japonya’da Kyobashi Seiwa binasında kullanılan aktif kütleli bir sistem şekil 1.33’deki gibi tasarlanmıştır [7].



Şekil 1.32. Aktif kontrollü sönümleyicilerin şematik diyagramı [7,21]



Şekil 1.33. Aktif kütle sönümleyicilerin kullanıldığı Kyobashi Seiwa binası tasarımı (Tokyo-Japonya) [7]

1.1.6. Yarı Aktif Sönümleyiciler

İnşaat mühendisliğinin diğer dallarıyla kıyaslandığında deprem mühendisliği, analiz ve tasarımda içerdiği pek çok belirsizlikten dolayı diğer dallardan farklılıklar gösterebilir. En önemli belirsizlikten biri deprem yüküdür. Yapının depremde etkilenmesi fay kırıklarından olan uzaklığı, zemin çeşidi gibi faktörlere bağlıdır. Bu sebepten dolayı ideal yapı deprem sarsıntıları sırasında, reaksiyon kuvvetleri veya anlık ayarlamalar yoluyla etkin bir şekilde deprem dalgalarına karşı koyma yeteneğine sahip akıllı yapılar olarak düşünülebilir. Aktif ve yarı aktif kontrol sistemleri aşırı derecede teknolojik alt yapı gerektiren sistemlerdir [10]. Yarı aktif kontrol sistemine ait şematik gösterim şekil 1.34'deki gibidir.



Şekil 1.34. Yarı aktif kontrollü sistem şematik diyagramı [8]

Sismik hareket esnasında aktif sistemlerde güç kaynağının kesilmesi sistemin kapanmasına neden olabilmektedir. Şekil 1.35'de görülen aktif ve pasif sönümleyicilerin bir karışımı olan yarı aktif sönümleyiciler sahip oldukları küçük bataryalar sayesinde deprem anında çalışmaya devam ederler [7].



Şekil 1.35. Yarı aktif kontrollü sönümleyici [7]

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sönüm

Sönüm titreşim hareketinde yitirilen enerjidir. Kinetik enerji ısıya dönüşmektedir. Sönümün bulunmadığı bir sistem titreşim hareketini sonsuza dek sürdürür. Gerçek sistemlerde her zaman sönüm bulunmaktadır [22]. Sönüm her çevrimde hareketin genliğinin azalmasına neden olur ve belirli bir süre sonra hareketin sona ermesini sağlar [22]. Sönümlemede titreşen sistemin enerjisi çeşitli mekanizmalar tarafından dağıtılır. Sarsıntıyla zorlanan yapı birkaç döngü yapar. Bu yüzden, yapının tepkisi çoğunlukla döngüsel titreşimle dağıtılan enerjiye bağlıdır. Bu sebepten dolayı, yapının enerji yutma özelliği döngüsel hareketin üzerinden belirli bir miktar tüketilir [13, 23].

Yapının tepkisinde her bir döngünün enerji yutmasından ziyade mekanizmanın doğal enerji yutması çok daha etkilidir. Deplasman ve döngü kuvvetleri altında bu davranış kuvvet-deformasyon histerik çevrimi oluşturur [13,23].

Bir deformasyon döngüsü sırasında dağıtılacak sönümleme enerjisi deplasman limitleri arasındaki histerik çevrimi içinde kalan alanlar tarafından hesaplanabilir [13].

Yapının veya yapıyı oluşturan bileşenlerin enerji dağılımını temsil etmek için sönümlemeyi tanımlayan çeşitli boyutsuz büyüklükte öneriler yapılmıştır. Çalışmalar kapsamında, bir yapının sönüm ölçülerini ifade etmek için en popüler boyutsuz büyüklük olarak sönüm oranı (ξ) parametresi geliştirilmiştir. Sönüm oranı aşağıdaki denklemle elde edilebilir [13].

$$C = 2\xi m \omega_0 = E_D / \pi \Omega U_0^2 \quad (2.1)$$

Sönüm katsayısı (C) serbest titreşim döngüsü içerisinde enerjiyi yutmanın bir ölçüsüdür. Buna ek olarak, sönüm oranı (ξ) yapının kütle ve rijitliğine bağlı birim bir ölçüdür. Yukarıdaki denklemde U_0 dalganın genliği, Ω frekans ve E_D sönümlenen enerjidir. Bu yüzden sönüm oranı aşağıdaki denklemdeki gibi elde edilebilir [13].

$$\xi = 1\omega_0 E_D / 4\pi \Omega E_S \quad (2.2)$$

Burada:

$E_S = 1/2 m \omega_0^2 U_0^2$ depolanan gerilme enerjisidir. Enerji, harmonik titreşim içinde sönüm süresi boyunca yok edilmektedir (E_D) [23, 13].

$$E_D = \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} (c\dot{u})\dot{u}dt = \int_0^{2\pi/\omega} c\dot{u}^2 dt = c \int_0^{2\pi/\omega} [\omega u_0 \cos(\omega t - \phi)]^2 dt = \pi c \omega u_0^2 = 2\pi \xi \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2 \quad (2.3)$$

Enerji sönümü, hareket genliğinin çerçevesi içinde bir orandır. Tam olarak bir değer değildir. Bu sebepten sisteme kuvvet yoluyla giren enerji (E_I) sönüm süreci ile yok edilebilir [13].

Dış kuvvet $P(t)$ ve sisteme giren enerji her bir tekrarlı titreşim döngüsü için denklem 2.4 aracılığıyla hesaplanabilir [23].

$$E_I = \int p(t) du = \int_0^{2\pi/\omega} p(t)\dot{u}dt = \int_0^{2\pi/\omega} [p_0 \sin \omega t][\omega u_0 \cos(\omega t - \phi)]dt = \pi p_0 u_0 \sin \phi \quad (2.4)$$

Giren enerji yer değişim genliği ile lineer olarak değişir. Bunun tersine sönümlenen enerji yer değişim genliği ile quadratik olarak değişir. Çalışmalara göre, her bir döngüde sisteme giren enerji sönümleme döngüsünde oluşan enerjiyi aşar. Bu durum diğer döngüde deplasmanda daha fazla genlik oluşmasına sebep olur. Deplasman genliğindeki artış ile sönümlenen enerji giren enerjiden daha hızlı artar [13].

Eğer bu enerji özel aletler vasıtasıyla sönümlenebilirse depremlerden sonra yapısal hasarlar azaltılabilir. Bu çeşit cihazlar yeni ve mevcut binaların depreme karşı güçlendirilmesinde kullanılabilir [13].

2.2. Sönümlenme Çeşitleri

Bir yapı yatay olarak yer değiştirdiğinde, yapının titreşim genliği kademeli olarak düşer ve sonlanır. Bu durum yapı elemanlarının kapasitesiyle alakalıdır. Titreşim enerjisi birleşim noktalarında veya kullanılan yapı malzemeleri yoluyla sönümlenmektedir. Bu durum sönümlenme olarak adlandırılır. Betonun çatlaması ve yapısal bileşenlerin inelastik hareketleri de yapılarda sönüm oluşturur [24].

2.4. Sönüm Katsayısı

Matematiksel doğrulama için sönüm vizkoz olarak kabul edilir ve sönüm katsayısı hareketin hızı için oransal olarak belirlenir. Rayleight sönümü matematiksel modeller arasında en önemlilerinden biridir. Rayleight sönümü, yapının modlarına göre kütle ve rijitlik ile orantılıdır. Sönüm matrisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir [24].

$$C_i = \alpha M_i + \beta K_i \quad (2.6)$$

Burada, α ve β ölçek çarpanı M_i ve K_i kütle ve rijitlik matrisleridir.

$$C_i = 2\xi_i\omega_i M_i, \quad K_i = \omega_i^2 M_i. \quad (2.7)$$

Bu denklemler aşağıdaki gibi düzenlenirse;

$$2\xi_i\omega_i M_i = \alpha M_i + \beta\omega_i^2 M_i \quad (2.8)$$

$$2\xi_i\omega_i = \alpha + \beta\omega_i^2 \quad (2.9)$$

Denklem düzenlenerek 2.10' denklemini elde edilir.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (2.10)$$

Titreşimin i ve j modları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \text{ and } \xi_j = \frac{\alpha}{2\omega_j} + \frac{\beta\omega_j}{2} \quad (2.11)$$

Buradan, α ve β değerleri çekilerek aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \{ \omega_j\xi_i - \omega_i\xi_j \} \quad (2.12)$$

Matris formu denklem 2.13'deki gibidir;

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \begin{pmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{pmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{pmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1/\omega_j & 1/\omega_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\xi_i = \xi_j = \xi; \alpha = \frac{2\omega_i\omega_j\xi}{\omega_j + \omega_i} \text{ ve } \beta = \frac{2\xi}{\omega_j + \omega_i} \quad (2.15)$$

α ve β değerleri tepkiye önemli ölçüde katkı veren her iki mod için arzu edilen sönüm oranına bağlı olarak hesaplanabilir. Diğer elastik modlar için ξ_k aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$\xi_k = \frac{\alpha}{2\omega_k} + \frac{\beta\omega_k}{2} \quad (2.16)$$

Bu teknik, özel herhangi iki mod için sönüm oranı seçmeyi gerektirir. Sönüm oranının seçilmesindeki belirsizlikler düşünüldüğünde pratikte alçak ve çok yüksek binalar için sönüm oranı bütün modlar için genellikle %5 olarak alınır [24].

2.5. Kritik Sönüm

Kritik sönüm, titreşim hareketinin oluşmasını engelleyen en küçük sönüm miktarıdır [22]. Tek serbestlik dereceli sönümlü sistemlerde serbest titreşimin oluşması için sönümün kritik sönümden küçük olması gerekmektedir [22]. Sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.17)$$

Bu denklemin genel çözümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left(x_0 \cos \omega_D t + \frac{\dot{x}_0 + x_0 \xi \omega}{\omega_D} \sin \omega_D t \right) \quad (2.18)$$

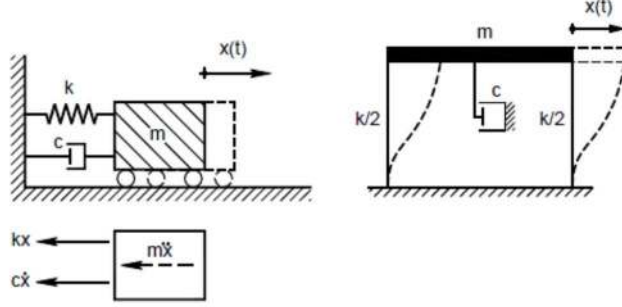
Burada x_0 , başlangıç yer değiştirmesi, $\dot{x}_0$ başlangıç hızıdır. Sönüm oranı, sönümün kritik sönüme oranı olduğundan, kritik sönüm titreşim hareketinin olmadığı en küçük sönüm değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [22].

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.19)$$

$$c_{cr} = 2m\omega = 2\sqrt{km} \quad (2.20)$$

2.6. Tek Serbestlik Dereceli Sönümlü Sistem

Tek serbestlik dereceli sönümlü sistemlerde titreşim oluşabilmesi için sönümün kritik sönümden küçük olması gerekmektedir [22]. Tek serbestlik dereceli sönümlü sisteme ait şematik gösterim şekil 2.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.1. Tek serbestlik dereceli sönümlü sistem [22]

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.21)$$

Burada, ω sönümsüz sistemin açısal frekansıdır. Sönümlü sistem için açısal frekans ω_D olarak alındığında $\omega_D < \omega$ dir.

Normal yapılar için sönümün kritik sönüme oranı %1 ile %10 arasında değişmektedir [22]. Sönümlü ve sönümsüz sistemlerinin periyotları arasında,

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.22)$$

Bağıntısı bulunmaktadır. Burada trigonometrik dönüşümler uygulanırsa denklem aşağıdaki şekle dönüşür.

$$x = \rho e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \alpha) \quad (2.23)$$

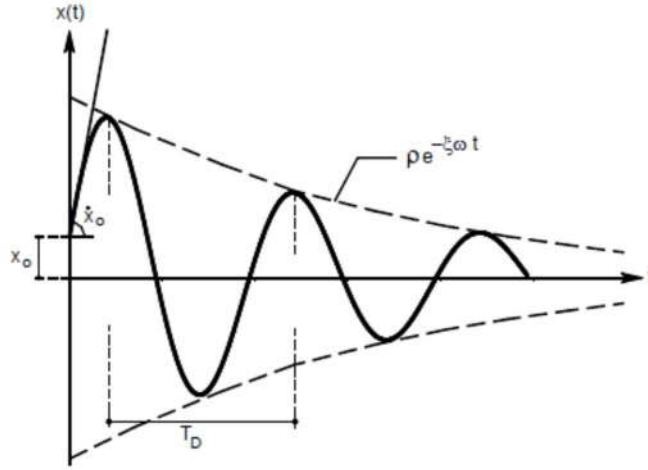
Hareketin genliği ρ aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\rho = \sqrt{x_o^2 + \frac{(\dot{x}_o + x_o \xi \omega)^2}{\omega_D^2}} \quad (2.24)$$

Faz açısı β ;

$$\tan \beta = \frac{(\dot{x}_0 + x_0 \xi \omega)}{\omega_D x_0} \quad (2.25)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Başlangıç hızı ve yer değiştirmesi ile hareket eden bir sistemin yer değiştirme ve zaman grafiği şekil 2.2’de görüldüğü gibidir [22].



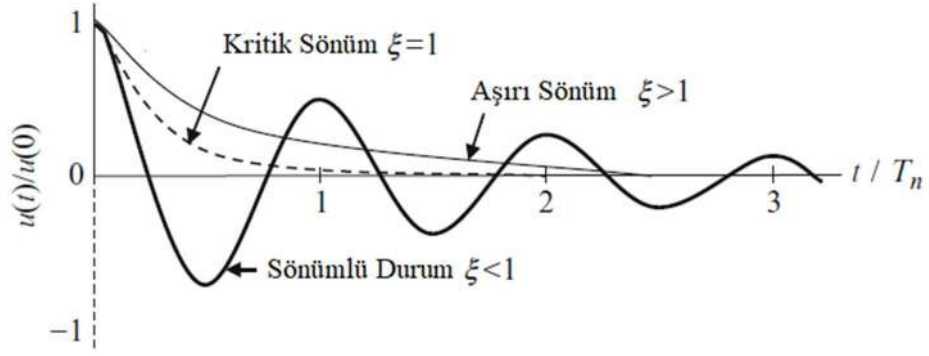
Şekil 2.2. Sönümlü Sistem serbest titreşim hareketi [22]

Titreşim sisteminin dinamik davranışı sayısal değerlerle belirlenir. Sönüm oranının salınımına olan etkisi şekil 2.3’de görülmektedir.

1- $\xi > 1$ ise, sistemde salınım olmaz çünkü sönüm etkisi titreşime sebep olduğu kuvveti gölgelemektedir. Bu duruma yapı aşırı sönümlü denilmektedir.

2- $\xi = 1$ ise, sistem kritik olarak sönüm seviyesindedir. Sistem titreşim karakteristiklerini düşürür ve en kısa zamanda denge pozisyonuna ulaşır.

3- $\xi < 1$ ise, sistem salınımı belirli zaman için denge durumuna ulaşır ve kademeli olarak durur. Bu duruma sönümlü sistem adı verilir.



Şekil 2.3. Sönüm salınımları [24]

2.7. Ek Sönüm

Ek sönümleme sistemlerinin kullanıldığı yapıların tasarımında kullanılan sönümleyici cihazların yapıya kattığı ek sönümleme değeri en önemli parametrelerden biridir. Ek sönüm miktarının belirlenmesi için pek çok yöntem geliştirilmiştir [25].

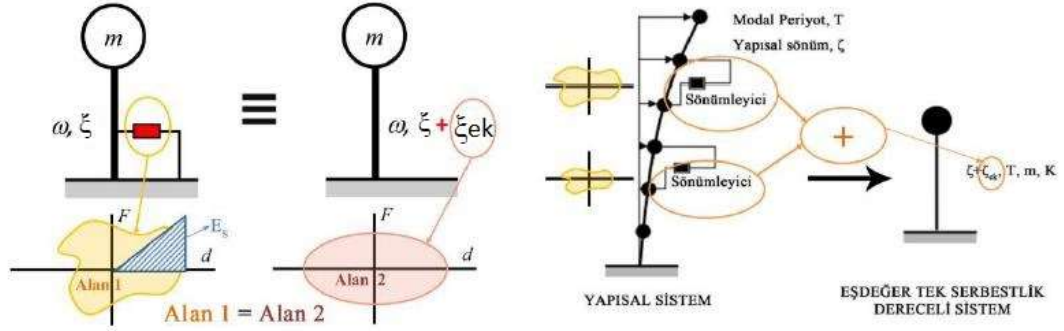
Bu çalışmada, ek sönüm hesapları için ASCE/FEMA yönetmeliklerinde yer alan histerik döngüye sahip sürtünme tipi sönümleyiciler için uygulanabilen modal şekil değiştirme enerjisi yöntemine yer verilmiştir.

2.7.1. Modal Şekil Değiştirme Enerjisi Yöntemi

2.7.1.1. Yöntem

Bu yöntemde, yapının modal davranışı vizkoz sönümlü tek serbestlik dereceli sistemle ifade edilmektedir. Bu yolla çözüme ulaşabilmek için taşıyıcı sistemin içsel sönüm miktarının ve sistemde kullanılan ek sönümleyicilerin sönüm miktarlarının önceden bilinmesi gerekir [25].

Bu ek sönüm miktarı, sönümleyicilerin yapının herhangi bir modu için harmonik hareketin bir çevrimi sonucu sönümlediği enerjinin, eşdeğer tek serbest dereceli sistemin harmonik hareket altında bir çevrim sonucu sönümlediği enerji miktarına eşit olduğu kabulü ile hesaplanmaktadır [25]. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümleyicilerin ek sönüme olan katkıları şekil 2.4'de şematik olarak gösterilmiştir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde kullanılan ek sönüm oranları toplanarak eş değer tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülebilmektedir.



Şekil 2.4. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için eşdeğer ek sönüm hesap modeli [25]

Ek sönüm hesabı denklem 2.26'daki gibi hesaplanabilir.

$$E = \int f \, du = \int_0^{2\pi/w} (cu) \dot{u} \, dt = 2\pi \xi \frac{w}{w_n} k u_0^2 \quad (2.26)$$

Burada tüm sistem için;

E : Tek serbestlik dereceli sistemlerde harmonik titreşimin bir çevrimi sonucunda sönümlenen enerji miktarları

k : Sistem rijitliği

w : Harmonik kuvvete ait frekans

w_n : Doğal frekans

u_0 : Yer değiştirme

ξ : Sönüm oranıdır [25].

$$E_s = \frac{1}{2} k u_0^2 \quad (2.27)$$

E_s : Yapısal sisteme ait şekil değiştirme enerjisi

2.27 denklemi, 2.26 denklemi içerisine yerleştirilirse denklem 2.28 elde edilir.

$$E = 4\pi \xi \frac{w}{w_n} E_s \quad (2.28)$$

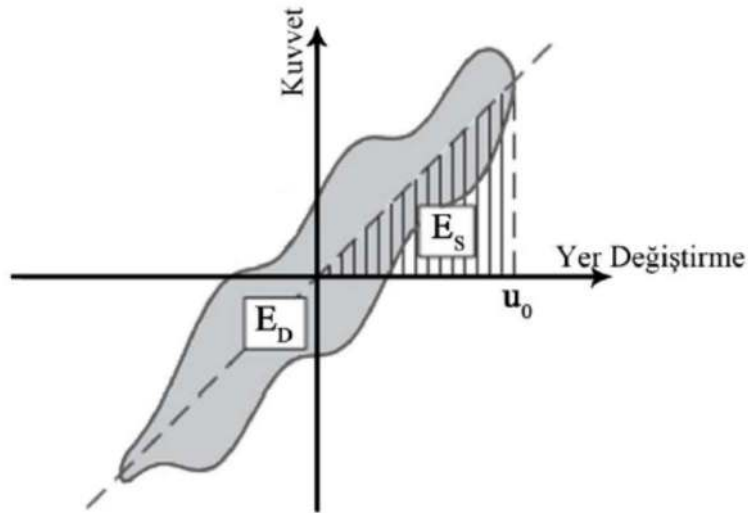
Yapısal sistemdeki sönümleyici cihazların sönümlediği enerji miktarı E_D , 2.28 denkleminde eşitlenerek ek sönüm miktarı bulunmuş olur [25].

$$E_D = E = 4\pi \zeta \frac{w}{w_n} E_S \longrightarrow \zeta_{EK} = \frac{E_D w_n}{4\pi E_S w} \quad (2.29)$$

Harmonik hareket altında, yapısal sistemdeki sönümleyici cihazların sönümlediği enerji miktarı E_D ve yapısal sistemin şekil değiştirme enerjisi E_S aşağıdaki gibi gösterilmiştir [25].

Şekil 2.5’den de anlaşıldığı üzere ED denklemi yapısal sistemin elastik limitler içinde kaldığı durumlar için geçerlidir. Formül içerisindeki w_n/w oranı, $w=w_n$ olarak alınır bu durum sönüm değerinin yapısal sistem istemleri üzerinde en çok etkili olduğu durumdur. Bununla birlikte bu oranın birden farklı değerleri için elde edilen sönüm değeri, bir değeri kullanılarak elde edilen sonuçlara yeterli yakınlık sağlaması ile 2.29 denklemi denklem 2.30’daki gibi sadeleştirilebilir [25].

$$\zeta_{EK} = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (2.30)$$



Şekil 2.5. Harmonik titreşimin bir çevrimi için E_D ve E_S [25]

Modal şekil değiştirme enerjisi yöntemi ile yapılan sönüm hesabı için izlenen adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Yapıda kullanılan sönümleyicilerin ek sönüm miktarları tahmin edilir iç sönümle beraber uygun ivme spektrumu oluşturulur [25].

2. Sönümleyiciye ait yer değiştirmenin en fazla olduğu anda modal periyodunun belirlenmesi: Sönümleme sisteminin başlangıç rijitliği değiştirilmeden yapı analiz edilir. İlgilenilen yön için elde edilen deplasman değeri kullanılarak yeni bir rijitlik hesaplanır. Bu işleme rijitlik değeri sabit kalıncaya kadar devam edilir. En son aşamada elde edilen efektif periyot değeri T_{eff} belirlenmiş olur [25].

3. Elde edilen efektif periyot modeli kullanılarak sönüm hesabı yapılan mod için yeni bir spektrum analizi yapılır ve ikinci adımda bahsedilen iterasyon işlemleri tekrarlanır. Mod için yeteri kadar yaklaşıklık sağlandığında elde edilen en büyük deplasman tespit edilir [25].

4. Sürtünme tipi sönümleyicilerde enerji yutma kapasitesi sönümleyicide oluşan maksimum yer değiştirme ve üzerine gelen yüklerle ilişkili olduğu için şekil 2.6’da görüldüğü gibi sönümleyicilerin sönümledikleri enerji miktarları her deprem seviyesinde farklılık göstermektedir. Deprem seviyesi ile kullanılan sürtünme tipi sönümleyicinin sönümlediği enerji arasındaki ilişki denklem 2.31’deki gibi hesaplanır [25].

$$E_D = 4(x_d - D_y)F_y \quad (2.31)$$

F_y : Akma kuvveti

D_y : Akma yer değiştirmesi

x_d : Sönümleyicide oluşan maksimum yer değiştirme [25].

Hesaplanan E_D değeri sönümleyicinin, harmonik titreşim altında maksimum yer değiştirme yaptığı çevrimi için sönümlediği enerjiye, yani histerik eğrisinin içerisinde kalan alana eşittir [25]. Sönümleyicinin maksimum yer değiştirmesi esnasında yapının yapmış olduğu şekil değiştirme enerjisi denklem 2.32 kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_s = \frac{1}{2} w^2 (m_1 x_{1,\max}^2 + m_2 x_{2,\max}^2 + \dots + m_n x_{n,\max}^2) \quad (2.32)$$

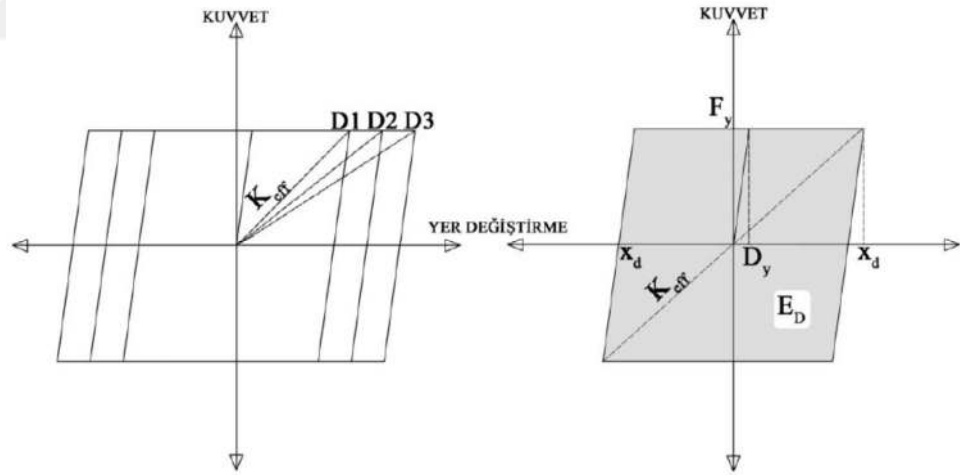
m_n : n. kat kütlesi

w : İlgilenilen modun frekansı

x_n : İlgilenilen mod için n. kat maksimum yer değiştirmesi [25].

6. Dördüncü ve beşinci adımda elde edilen E_D ve E_S değerleri denklem 2.32’de yerine konularak yerine koyularak sönümleyiciler tarafından yapıya sağlanan ek sönüm miktarı (ξ_{ek}) bulunmuş olur [25].

7. Elde edilen sönüm miktarı, ilk adımda kabul edilen sönüm miktarıyla hazırlanan ivme spektrumu ile yer değiştirilerek yukarıda belirtilen tüm adımlar tekrar edilir. Bu işleme elde edilen sönüm miktarı ile bu sönümü elde etmek için kullanılan sönüm değeri eşitleninceye kadar devam edilir. Gerekli yaklaşıklık sağlanınca ilgili mod için ek sönüm değeri belirlenmiş olur [25].



Şekil 2.6. Sürtünme tipi sönümleyicilerin farklı deprem seviyeleri için davranışı [25]

2.7.2. ASCE/FEMA Yaklaşımı ile Sönüm Hesabı

2.7.2.1. Yöntem

Sürtünme tipi sönümleyicilerin sağladığı ek sönümün hesabında Fema 450 bölüm 15 ve ASCE 7-10 bölüm 18’de yer alan esaslar kullanılacaktır. Bu yöntemle, yapının seçilen bir yönünde oluşan deplasmanı için ilgili modu kullanılarak sönüm hesabı yapılabilir [25]. Sönüm hesabında kullanılan formüller şu şekildedir.

$$\beta = \beta_1 + \beta_v \sqrt{\mu} + \beta_H \quad (2.33)$$

β_1 : yapı içsel sönümü

β_v : Yapının ilgilenilen yönünde dikkate alınan modu için sönümleyici sistemin, yatay yük taşıyıcı sistemin efektif akma yer değiştirmesinde ya da hemen öncesinde sönümlediği viskoz enerjiyi dikkate alan bileşen [25,26].

β_H : Yapının sönüm hesabı yapılan yönü için yatay kuvvet taşıyıcı sistem ve sönümleyici sistem elemanlarının akma durumundan sonra oluşan histerik davranışlarını dikkate alan bileşen [25,26].

β_H bileşenin hesabı şu şekilde yapılmaktadır [26].

$$\beta_H = q_H (0.64 - \beta_1) \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (2.34)$$

$$q_H = 0.67 \frac{T_s}{T_1} \quad 0.5 \leq q_H \leq 1.0 \quad (2.35)$$

$$\mu = \frac{D_1}{D_{eff}} \quad \text{veya} \quad \mu = \left(\frac{T_1}{T_{eff}} \right)^2 \quad (2.36)$$

μ : Efektif süneklik

q_H : Histerik döngü düzeltme faktörü

D_1 : İlgilenilen yönde, depremin yapının temel modunda çatı seviyesinin meydana gelen deplasman.

D_{eff} : yatay kuvveti karşılayan taşıyıcı sistemin efektif akma noktasında yapının çatı katı seviyesinde meydana gelen deplasman [25].

ASCE/FEMA yaklaşımı ile yapılan sönüm hesabı için şu adımlar izlenebilir.

1- Sönümleyicilere başlangıç rijitliği verilerek yapılan modal analiz sonrasında birinci mod için elde edilen periyot değeri (T_1) elde edilir [25].

2- Modal periyot, iterasyon işlemi uygulanarak bulunur. Sönüm cihazının rijitliği yapıya ilave edilir. Tasarım sönüm oranı ile elde edilen tepki spektrumu kullanılarak yapı analiz edilir. Sönümleyici kapasitesi değiştirilmeden yeni rijitlikler hesaplanır. Analizler sonrasında yer değiştirme değerleri sabit kaldığında iterasyonun yeterli olduğu kabul edilir ve bu konumda efektif periyot değeri (T_{eff}) belirlenir [25].

3-Efektif sünekliğin hesaplanması: Efektif süneklik değeri ASCE7/10 dokümanlarında verilen 2.36'nolu denklem aracılığı ile hesaplanır [25].

4- Histerik döngü düzeltme faktörü denklem 2.35 yardımıyla belirlenir [25].

5-Sönümleyicinin yapıya kazandırdığı ek sönüm denklem 2.34 ile hesaplanır [25].

6-Elde edilen ek sönüm yapının içsel sönümüne eklenerek toplam sönüm elde edilir [25].

7- Elde edilen toplam sönüm kullanılarak yeni bir ivme spektrumu hazırlanır ve T_{eff} 'in modelinde analiz edilir. Yukarıda bahsedilen adımlar tekrar edilerek yeni bir sönüm elde edilir. Bu işlem elde edilen sönüm değişmeyene kadar devam ettirilerek yapının son sönüm miktarı belirlenmiş olur [25].

2.7.3. Ek Sönüm Örnek

Sönümleyici Akma Kapasitesi. 500 kN, akma yer değiştirmesi: 0.003 m, başlangıç rijitliği: 166.667 kN/m

Sisteme etkiyen deprem yükü hesabı için ivme spektrumu başlangıç sönüm değeri 0,05 olacak şekilde alınmıştır.

Analiz sonrasında, $T_1=0.01814$ sn olarak hesaplanmıştır. Sistemde 3 iterasyondan sonra periyotlarda bir değişiklik görülmediği için $T_{eff}= 0.00536$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 2.36 kullanılarak $\mu = 11,45$ olarak hesaplanmıştır.

Denklem 2.35’de belirtilen q_H düzeltme faktörü 0.5 alınarak denklem 2.34’de yerine konulduğunda ek sönüm miktarı hesaplanmıştır. Bulunan sönüm yeni oluşturulan ivme spektrumda yerine konularak tekrar iterasyon yapılmış ve bu işlem değerler sabitlenene kadar devam ettirilmiştir. Bu işlemler sonrasında sistemin ek sönümü 0.28, toplam sönüm oranı 0,33 olarak hesaplanmıştır.

2.8. Sürtünme

Sürtünme, birbirine temas eden iki malzemenin yüzeyleri üzerinde hareket ettirilmesi sonucunda malzemelerde oluşan direnç olarak adlandırılabilir. Sürtünme, sürtünen iki yüzey için belirli değerler arasında olmalıdır. Düşük sürtünme nedeniyle bir araç istenilen mesafede durmayabilir veya fazla sürtünmeden dolayı zarar görebilir [27].

2.9. Sürtünme Kanunları

Sürtünme kanunları iki temel esas üzerinden incelenebilir. Birinci kanun yüzey alanlarına temas eden sürtünme kuvveti yüzey alanından bağımsızdır. İkinci kanun ise sürtünme kuvveti sürtünmeye maruz iki cisme uygulanan normal yük ile doğru orantılıdır. Yani yüzey alanları temas eden iki cisimde normal kuvvet arttırılırsa sürtünme kuvveti de artmaktadır. Bu kural "Amontos" kuralı olarak bilinir ve 1699 yılında Fransız bilim adamı Amantos tarafından çıkarılmıştır. Bunların dışında üçüncü kural ise kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır. Üçüncü kural Columb tarafından 1785 yılında çıkarılmıştır [27].

2.10. Sürtünme Teorileri

Sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin birbirleriyle olan etkileşimleridir. Çünkü sürtünme sonucu deformasyona uğramayan pürüzlü yüzeylerin teması sonucunda sürtünme meydana gelir [27].

2.10.1. Mekanik Kilitlenme Teorisi

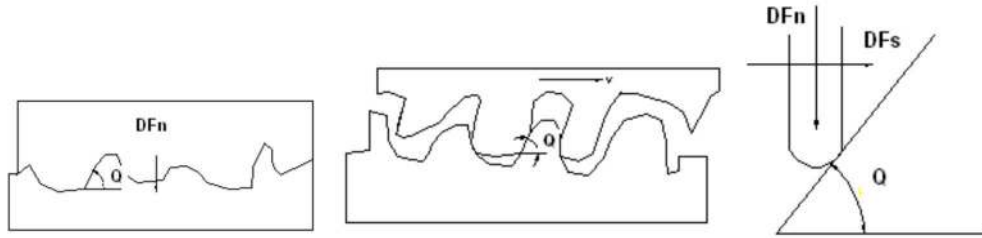
Bu teori yüzeydeki girinti ve çıkıntıların birbiri içerisine geçmiş olması üzerine kurulmuştur. Yüzeylerin hareket edebilmesi için pürüzlerin kuvvet tarafından kesilmesi gerekir. Kesmeyi gerçekleştiren bu kuvvet sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. Bu teori ilk olarak 1699 yılında Amontons Coulomb tarafından bulunmuştur fakat bu teoriyle sürtünmedeki enerji kaybı açıklanamamaktadır [27].

Şekil 2.7’de Colulomb’un sürtünme modeli görülmektedir. Burada;

DFs: Sürtünme kuvvetini,

DFn: Normal kuvveti

Q: Pürüz kısmın taban açısını ifade eder [27].



Şekil 2.7. Amontons Coulomb’un sürtünme modeli [27]

2.10.2. Moleküler Çekim Teorisi

Bu teoride Sürtünen yüzeyler arasında moleküler düzeyde bir bağ oluşur. Sürtünme kuvveti ise bu moleküler bağı yenen kuvvettir [27].

2.10.3. Elektrostatik Kuvvetler

Bu teoriye göre sürtünme, sürtünen iki yüzeyde birbirlerine zıt iki farklı elektrostatik yük oluşturur. Bu elektrostatik yükler arasında oluşan çekme kuvvetleri yüzeylerin hareketini engeller [27].

2.10.4. Kaynaklaşma, Kesme-Kazıma

Bu teoriye göre birbirleri üzerine baskı uygulamam cisimler temas eden yüzeyleri yüksek basınç sebebiyle bölgesel olarak kaynaşır. Hareketin başlaması kayma noktalarının kesilmesine bağlıdır. Eğer yüzeylerin sertlikleri farklı ise basınç ile sert olan yüzey yumuşak olan yüzeyi içerisine gömülür. Bu durumda hareketin başlayabilmesi için sert yüzeyin yumuşak yüzeyi kesmesi-kazıması gerekir. Bu

konuda yapılan çalışmalarda iki yüzeyin gerçek temas alanının toplam yüzey alanından çok daha az olduğu görülmüştür. Teorik olarak değen ilk üç noktada oturma oluşur. Bu noktaların elastik ve plastik deformasyonu sonucunda değeme alanları genişler ve diğer yüksek yüzeyler birbiri ile temas eder yüzeylere uygulanan kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak yüzey temasları genişler ve en sonunda bir denge meydana gelir [27].

Bowden ve Tabor'' sürtünme prensibini iki farklı kaynağa dayandırmaktadır.

1- Cisimlerin temas ettiği alanlarda oluşan kaynak bağlarının koparılması için uygulanan kuvvete F_s denir [27].

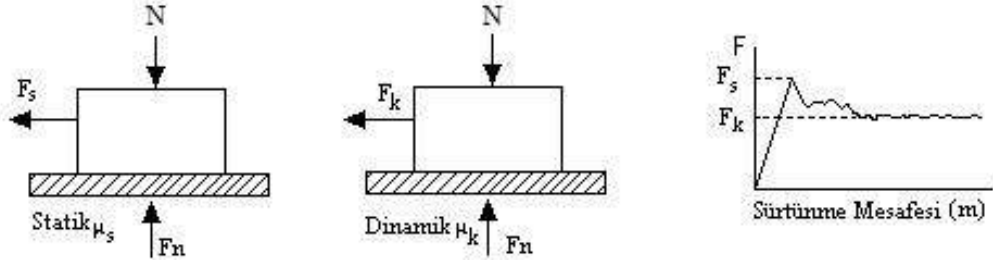
2- Sürtünen iki yüzey arasında sert cisme ait pürüzlerin yumuşa kısımda ilerleyebilmeleri için gerekli olan kuvvet (S) olarak adlandırılır. Bu kuvvet genellikle ihmal edilir. $F = F_s + S$ dir [27].

Coulomb'a göre, Sürtünme kuvveti $F_s = \mu N$ olarak tanımlanır. Burada μ statik ve kinetik sürtünme katsayısı, N kayan yüzeyler arasındaki kayma kuvvetidir. Hareket başladığında kayma kuvvetinin hızdan bağımsız olduğu kabul edilir. Sürtünme kuvvetinin yönü hareket yönünün tersidir [23].

$$F_s = \mu N \quad (2.37)$$

Sürtünme kanunları çerçevesinde, (F_s) hareketin başladığı kuvvet ve (F_n) sürtünme yüzeyine etki eden kuvvet arasında $F_s = \mu_s F_n$ ilişkisi vardır. Bu denklemde μ_s statik sürtünme katsayısı olarak adlandırılır [18]. Kayma yüzeyleri arasında kayma oluştuktan sonra sürtünme kuvvetinin düştüğü görülür [18]. Sürtünme kuvveti statik olmaktan çıkarak kinetik duruma geçer. Oluşan kuvvet F_k 'dir. F_k ve F_n arasında $F_k = \mu_k F_n$ ilişkisi vardır. $\mu_k < \mu_s$, Burada μ_k kinetik sürtünme kat sayısıdır [27].

Cismin statik durumdan kinetik duruma geçmesi anında F_k kuvvetinin düştüğü ve sürtünme mesafesi boyunca hareketin sabit kaldığı Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları [27]

2.11. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metodudur [28]. Bu yöntem ilk defa 1956 yılında uçak gövdelerinde meydana gelen gerilmeleri hesaplamak amacıyla geliştirilmiş olmasına karşın daha sonraki yıllarda farklı mühendislik alanlarında kullanımı yaygın bir şekilde artmıştır. Sonlu elemanlar metodu çözüm tekniklerinin gelişmesi ve en karmaşık sistemlerin bile sadece birkaç verinin değiştirilmesi sayesinde hesaplanabilmesi özelliği sayesinde günümüzde mühendislik alanı ve pek çok alanda en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir [28].

Sonlu elemanlar yöntemi ile karmaşık problemler basite indirgenmektedir. Basite indirgenen yöntem çıktısı gerçek çıktıya nazaran çok az farklılık gösterebilmektedir ancak kesin sonuç elde edilmek istendiğinde çözüm için daha fazla çaba harcandığında kesin sonuca çok daha fazla yaklaşılabilmektedir [28]. Diğer yöntemlerin çıktıları gerçek çıktılarından çok daha uzak olması ve çözümlerinin çok daha karmaşık olması nedeniyle sonlu elemanlar günümüzde inşaat, makine gibi pek çok sektörde kullanılan tek yöntemdir [28]. Sonlu elemanlar yönteminin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

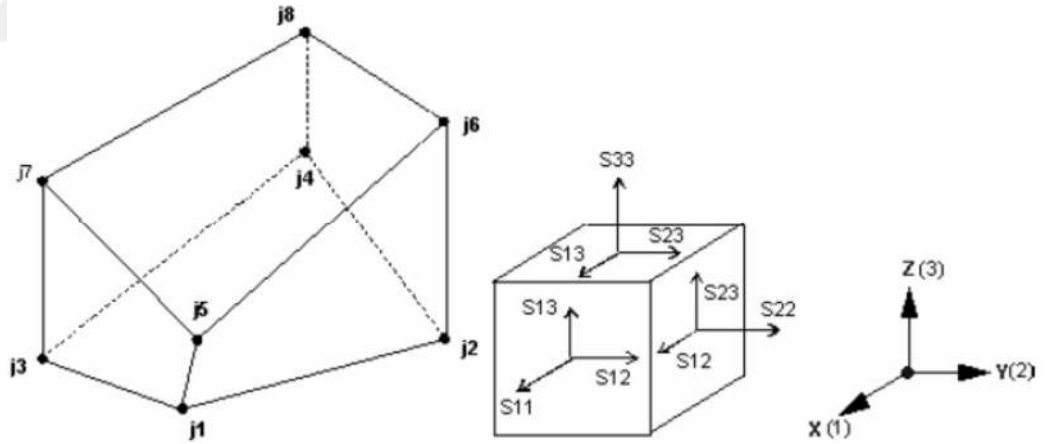
- ✓ Malzeme özellikleri farklı olan cisimler beraberce çözülebilmektedir.
- ✓ Geometrisi düzgün olmayan şekil veya kenarlar çözülebilmektedir.
- ✓ Çözümde eleman boyutları rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Bu durum çözüm kolaylığı bakımından büyük avantaj oluşturmaktadır.
- ✓ Cisimlere her türlü sınır koşulu verilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında atılan temel adımlar şu şekilde sıralanabilir.

- 1- Çözölmek istenen eleman küçük parçalara (sonlu eleman) bölünür,
- 2- Sonlu eleman sekil fonksiyonları belirlenir, eleman matrisleri belirlenir, eleman matrisleri birleştirilerek sistem matrisleri elde edilir.
- 3- Sınır şartları uygulanır, sistem denge denklemi çözölür ve çözümlerin ve istenilen değlerlerin ileri hesaplaması yapılır [29].

Sonlu Eleman Yönteminde, gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmesi eleman tipine, geometrisine ve sayısına bağılıdır. Şekil 2.9'da gösterilen 3 boyutlu, altı yüzlü 8 düğüm noktalı eleman için Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sekil fonksiyonları eşitlik 2.38'de verilmiştir [29].

$$\bar{N}_1(r) = \frac{1}{2}(1-r^2), \bar{N}_2(s) = \frac{1}{2}(1-s^2), \bar{N}_3(t) = \frac{1}{2}(1-t^2) \quad (2.38)$$



Şekil 2.9. Altı yüzlü eleman [29]

Solid eleman için rijitlik matrisi aşağıda açıklanmıştır. Lokal koordinatları bilinen eleman üzerindeki herhangi bir noktanın global koordinatları eşitlik 2.39 yardımıyla bulunur [29].

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_8 \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

Buradaki x_i ($i=1,2 \dots 8$), y_i ($i=1,2 \dots 8$) ve z_i ($i=1,2 \dots 8$) sırasıyla düğüm noktalarının global eksen takımındaki koordinatlarını vermektedir. N matrisi 3×8 boyutundadır [29].

$$N_i(r,s,t) = \frac{1}{8} (1+rr_i)(1+ss_i)(1+tt_i) : i=1,2,\dots,8 \quad (2.40)$$

Eşitlik 2.40'da verilen lineer lagrangien şekil fonksiyonları için r_i , s_i , t_i ile gösterilen değerler ilgili düğüm noktalarının lokal koordinat değerleridir. Eşitlik 2.40'da verilen N matrisi lineer lagrangien şekil fonksiyonları cinsinden eşitlik 2.41'deki gibi ifade edilir [29].

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots & N_8 \end{bmatrix}_{3 \times 8} \quad (2.41)$$

Eşitlik 2.41 başka bir gösterim ile eşitlik 2.42'deki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^8 N_i x_i \\ \sum_{i=1}^8 N_i y_i \\ \sum_{i=1}^8 N_i z_i \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

Genel deplasman fonksiyonları ise düğüm noktaları deplasmanlarına bağlı olarak eşitlik 2.43’de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ w_s \end{Bmatrix} = [N] \bar{Q}^{(e)} \quad (2.43)$$

Burada Q düğüm noktalarının deplasmanlarını veren matristir. u, v ve w sırasıyla x, y, ve z yönlerindeki deplasmanlardır. Şekil değiştirme ile deplasmanlar arasındaki ilişki, elastisite teorisinden bilindiği üzere, aşağıdaki matris denklem takımı ile gösterilmiştir [29].

$$\vec{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = \underset{6 \times 24}{[B]} \underset{24 \times 1}{\bar{Q}}^{(e)} \quad (2.44)$$

Eşitlik 2.46’deki B matrisi, gerinim deplasman matrisidir ve eşitlik 2.45’deki yazılabilir.

$$\underset{6 \times 24}{[B]} = \underset{6 \times 3}{[B_1]} \underset{3 \times 8}{[B_2]} \dots \underset{6 \times 8}{[B_s]} \quad (2.45)$$

$$[Bi]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,8 \quad (2.46)$$

Eşitlik 2.46 ifadesinin türev ifadesi Eşitlik (2.47, 2.48) şeklinde yazılır.

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{array} \right\} = [J] \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{array} \right\} \quad (2.48)$$

Eşitlik 2.48’de verilen J matrisi Jakobiyan matrisidir ve Eşitlik 2.49 ile tanımlanmıştır.

$$[J]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} z_i \right) \\ \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} z_i \right) \\ \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} z_i \right) \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Eşitlik $\frac{\partial N_i}{\partial r}$, $\frac{\partial N_i}{\partial s}$ ve $\frac{\partial N_i}{\partial t}$ 2.49’da verilen ifadeleri eşitlik 2.50’de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial r} &= \frac{1}{8} r_i (1 + s s_i) (1 + t t_i) \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} &= \frac{1}{8} s_i (1 + r r_i) (1 + t t_i) \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} &= \frac{1}{8} t_i (1 + r r_i) (1 + s s_i) \end{aligned} \right\}, \quad i=1,2, \dots, 8 \quad (2.50)$$

Lokal ve loba! eksenler arasındaki ilişkidenden Eşitlik 2.51’de verilen ifade yazılır.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Eleman rijitlik matrisi yukarıda açıklanmış olan ifadeler yardımıyla eşitlik 2.52’de gösterildiği gibi yazılabilir. Burada D gerinim ile gerilme arasındaki ilişkiyi veren malzeme matrisidir [29].

$$[K]^{(e)} = \int \int \int_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV \quad (2.52)$$

Eşitlik 2.52’de verilen, dV Eşitlik 2.53 ile tanımlanmaktadır.

$$dV = dxdydz = \det[J].drdsdt \quad (2.53)$$

Bu ifade yerine yazıldığında Eşitlik 2.54 elde edilir.

$$[K^{(e)}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det[J] drdsdt \quad (2.54)$$

Sekiz düğüm noktalı tetra (prizma) elemanı için lineer şekil fonksiyonlu eleman matrisinin lokal koordinatlardaki ifadesi eşitlik 2.55’de elde edilir [29].

$$[K^{(e)}] = \sum_{r=R_1}^{R_2} \sum_{s=S_1}^{S_2} \sum_{t=T_1}^{T_2} \left([B]^T [D][B] \det[J] \right) \left[\begin{matrix} R_1, S_1, T_1 \\ R_2, S_2, T_2 \end{matrix} \right] \quad (2.55)$$

3. TEORİK ÇALIŞMA

Teorik çalışma kapsamında, mafsal özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyicinin sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, yakınsaklık analizi, sonlu elemanlar analizi ve sonuçları üzerine araştırmalar yapılmıştır.

3.1. Sürtünme Modelinin Oluşturulması

Sürtünme, yüzeyin sürtünme sertliği ve katsayısı, sıcaklık, normal gerilme ve göreceli hız gibi durumları içeren karışık fiziksel bir durumdur. Bu problemler çoğunlukla etkileşim yüzeylerinde (kontak yüzeyleri) nötr çizgisi problemlerine sebep olabilmektedir. Bu şu anlama gelir, kontak yüzeyi boyunca yüzey parçasının malzemesi bir doğrultuda akar ve diğer yüzeyde yüzeyin diğer parçası yönünde akma oluşur. Bu tür nötr çizgiler geneldir ve önceden bilinemez [30].

Gerçek sürtünme fiziği ve matematiksel modeli üzerine araştırmalar devam etmektedir. En popüler sürtünme modeli Coloumb sürtünme modelidir. Bu model dövme demir işlemleri gibi sistemler hariç pek çok sistemde kullanılmaktadır. Bazı uygulamalar için kesme sürtünme modeli daha uygun olmaktadır [30].

3.1.1. Coulumb Sürtünme Modeli

Coulomb sürtünmesi aşağıdaki gibi karakterize edilebilir.

$$\|\sigma_t\| < \mu \sigma_n \quad \text{ve} \quad \sigma_t = -\mu \sigma_n \cdot \mathbf{t} \quad (\text{Kayma}) \quad (3.1)$$

Burada;

σ_t , Tanjantianal sürtünme gerilmesi

σ_n , Normal gerilme

μ , Sürtünme katsayısı

$\mathbf{t}$, göreceli hız yönünde tanjantianal vektör, denklem 3.1'deki gibi hesaplanabilir.

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{v}_r}{\|\mathbf{v}_r\|} \quad (3.2)$$

$\mathbf{v}_r$, göreceli kayma hızı

Benzer şekilde Coulomb modeli gerilme yerine noktasal kuvvetlerle de yazılabilir.

$$\| \mathbf{f}_t \| < \mu f_n \quad (3.3)$$

$$\mathbf{f}_t = -\mu f_n \cdot \mathbf{t} \quad (\text{Kayma}) \quad (3.4)$$

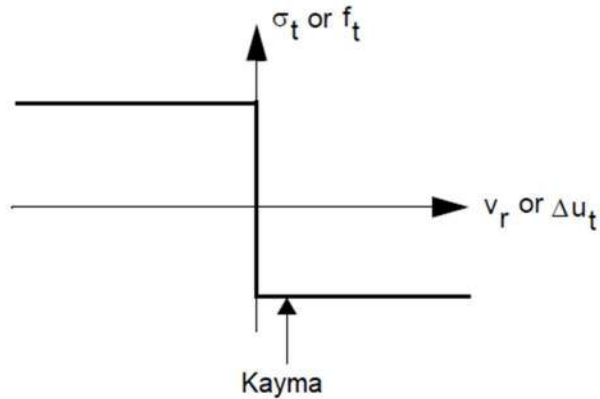
Burada;

f_t , tanjantianal sürtünme kuvveti

f_n , Normal kuvvet

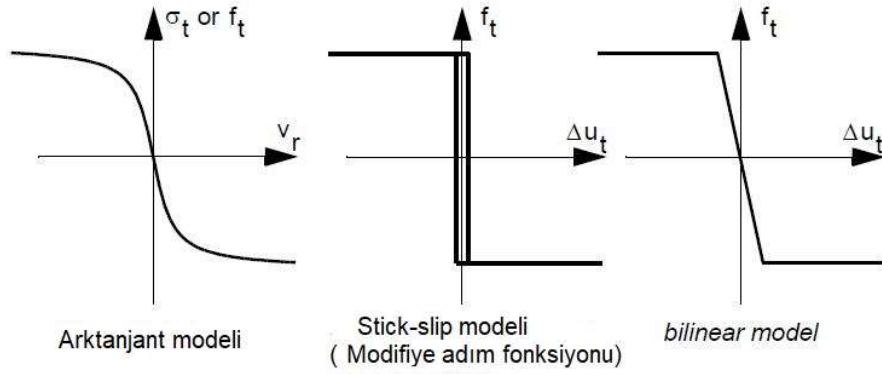
Coulomb modeli gerilme temelli kullanıldığında entegrasyon nokta gerilmelerinde önce noktalar çözülür sonra dönüşür. Böylece direk bileşen kontak yüzeyi için normal olur. Bu normal gerilme ve göreceli kayma hızı göz önüne alındığında tanjantianal gerilme daha sonra değerlendirilir ve noktasal kuvvet hesaplanır. Kabuk elemanlar için, noktasal kuvvete dayanan Coulomb modeli kullanılmalıdır. Çünkü, azaltılmış gerilme $p_n=0$ kabul edilir. Sürekli elemanlar için hem gerilmeye dayalı hemde kuvvete dayalı Coulomb modelleri kullanılabilir [30].

Normal gerilme ve normal kuvvet, sürtünme gerilmesi ve kuvveti V_r , kayma hızı ve göreceli tanjantianal arttırımsal yer değiştirme Δu_t , değerlerine bağlı olarak şekil 3.1’de gösterildiği gibi adım fonksiyonuna sahip olurlar. Burada göreceli hız ve kademeli şekil değiştirme skaler değerlerdir [30].



Şekil 3.1. Coulomb sürtünme modeli [30]

Sürtünme değerindeki kesintiler sayısal hesaplarda zorluklara sebep olabilir adım fonksiyonlarında değişik yaklaşımlar uygulanmaktadır. Şekil 3.2’de bu durum grafik olarak verilmiştir [30].



Şekil 3.2. Coulomb sürtünme modelinde değişik yaklaşımlar [30]

3.1.2. Ark tanjant Modeli

İlk prosedür, göreceli kayma hızı açısından sürekli bir şekilde farklılaştırılabilen bir fonksiyona dayanmaktadır.

Sürtünme gerilmesi için denklem 3.5 kullanılabilir.

$$\sigma_t = -\mu \sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\|v_r\|}{RVCNST}\right) \cdot t \quad (3.5)$$

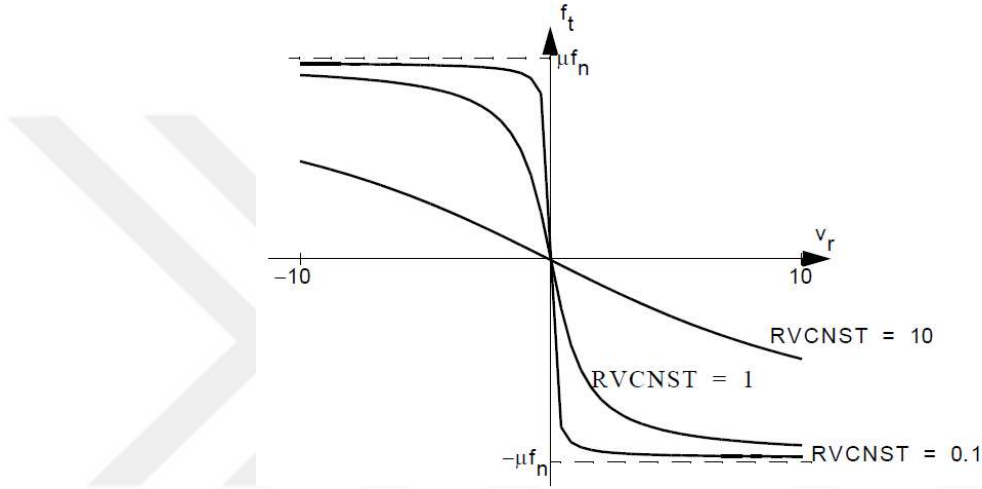
Sürtünme kuvveti için denklem 3.6 kullanılabilir.

$$f_t = -\mu f_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\|v_r\|}{RVCNST}\right) \cdot t \quad (3.6)$$

Sürtünme gerilmesi ve sürtünme kuvveti için fiziksel olarak, RVCNST değerleri göreceli hız değeri olarak alınabilir. RVCNST değeri matematiksel model adım fonksiyonlarının ne derece temsil edileceği konusunda çok önemlidir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi çok büyük alınan RVCNST, etkili sürtünme değerini düşürmektedir. Çok küçük değerler ise zayıf bağlanmalara sebep olabilmektedir.

RVCNST değeri göreceli kayma hızı $|V_r|$ %1 ila %10' u arasında olmalıdır [30]. Sürtünme sadece dış yük vektörünü etkilemez, global seviyede çözülen son denklemlerin rijitlik matrisinde etkiler. Rijitlik matrisi katkısı aşağıdaki gibidir:

$$K_{ij} = -\frac{\partial f_{t_i}}{\partial v_{r_k}} \frac{\partial v_{r_k}}{\partial \Delta u_{t_j}} \quad (3.7)$$



Şekil 3.3. Farklı RVCNST değerleri için yaklaşık adım fonksiyonu
($-10 < V_r < 10$) [30]

$\delta f_t^{(i)}$ Newton-Raphson sürecinin (i) iterasyonu sırasında, sürtünme kuvveti değişimi göreceli sürtünme hızı $\delta v_r^{(i)}$ değişimine bağlıdır. Bu sebepten dolayı denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\delta v_r^{(i)} = \frac{\Delta \mathbf{u}_t^{(i)} - \Delta \mathbf{u}_t^{(i-1)}}{\Delta t} = \frac{\delta \mathbf{u}_t^{(i)}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Son denklem, deplasman serbestlik derecesi ile ifade edilebilir. İlk artış değerlerindeki ilk iterasyon sırasında yakınsama aşağıdaki formülasyon kullanılarak önemli ölçüde geliştirilebilir [30].

$$\delta v_r^{(1)} = \frac{\Delta u_t^{(1)}}{\Delta t} - \frac{\Delta u_t}{\Delta t} = \frac{\delta u_t^{(1)}}{\Delta t} - v_r \quad (3.9)$$

Yumuşatma prosedürü sonucunda, kontaktaki bir nokta her zaman bir kaymaya sahiptir. Bunun yanında sayısal sonuçlar fizik temellidir. Oden ve Pires metaller için şu bilgiyi vermektedir. “Düzgün olmayan yüzeylerin mikroskobik ölçüde elasto plastik deformasyonu vardır” (soğuk kaynak) bu lokal olmayan non linear kontaklara yol açar. Sürtünme modelinin ark tanjant yaklaşımı nonlinear sürtünme davranışının matematiksel idealizasyonudur [30].

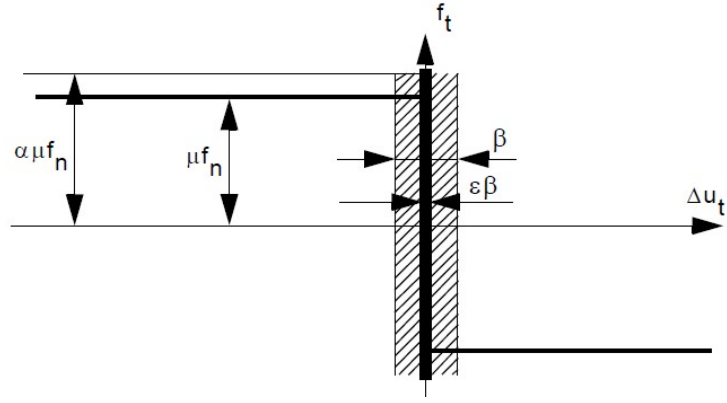
3.1.3. Değiştirilebilir Adım Fonksiyonu Modeli

İkinci prosedür kısmen değiştirilmiş adım fonksiyonlarına dayanmaktadır. Bu prosedürde, her bir düğüm noktası kontak içinde katı veya kayar sürtünme statüsü kazanır. Statüye bağlı olarak iterativ çözüm sürecinde her bir iterasyondan sonra farklı bağlantılar uygulanır [30].

Sürtünme durumu kontrollerinde Şekil 3.4’de yer alan parametreler kullanılır. Burada sürtünme katsayısı çarpanı α , katıdan kayar duruma geçen bölge β ve sürtünme yükü toleransı ε olarak alınmıştır [30].

Çarpan α (ön tanımlı değer 1.05) dinamik ve statik sürtünme arasını simule etmek için çok yüksek bir değer alınabilir. Kayar dan sert bölgeye geçiş bölgesi β (ön tanımlı değer 1×10^{-6}) sürtünme çözümünde tolerans değeridir [30].

β parametresi ve azaltma faktörü için $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ kullanılır. Bu sabit faktörler ε ve β değerlerinin çok küçük olmasını sağlarlar. Bu ilk kabul sürtünme statüsünün kontrolü sürecinin başlamasını sağlarlar [30].



Şekil 3.4. Değiştirilmiş adım fonksiyonu sürtünme parametreler [30]

Burada,

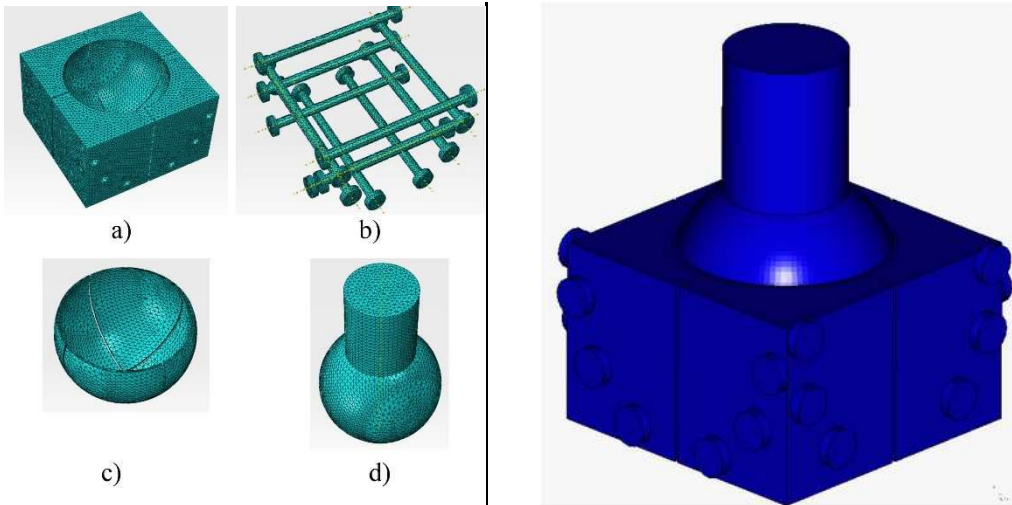
α , sürtünme katsayısı çarpanı

β , kaymadan, sert bölgede geçiş bölgesi

ϵ , azaltma faktörü (1×10^{-6}) dır.

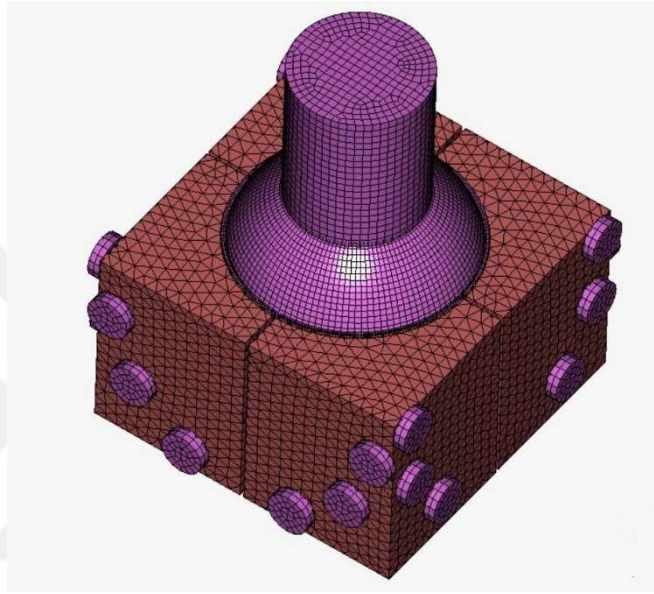
3.2. Mafsal Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyicinin üç boyutlu Sonlu Elemanlar Modelini Oluşturulması

Sönümleyici' ye ait sonlu elemanlar katı modeli şekil 3.5'de görülmektedir. Model, 4 parçadan oluşan gövde bölümü (a), saplama elemanları (b), sürtünme pedleri (c) ve küre elemanından oluşmaktadır. (d) Sistemde coulumb sürtünme modeli kullanılmıştır.

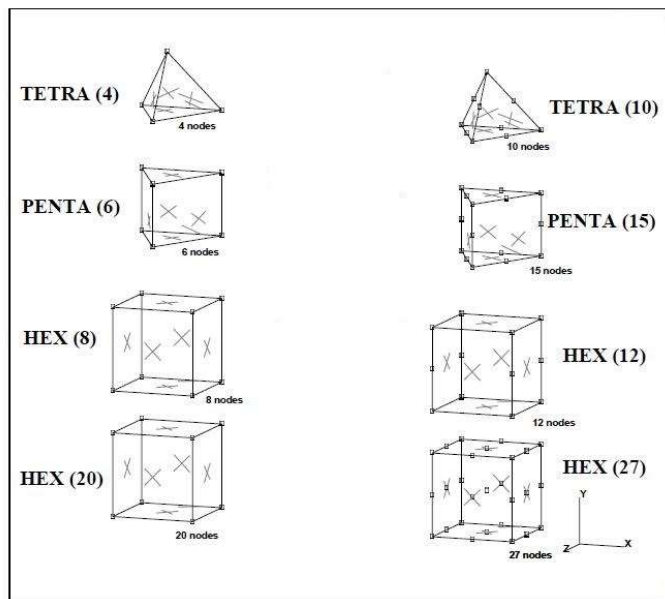


Şekil 3.5. Mafsal özellikli Sürtünme tipi Sismik sönümleyicinin üç boyutlu katı modeli

Sönümleyici modeli üzerinde sürtünmeye maruz kalan sürtünme pedleri ve küresel eleman, geometrik şekil olarak hex mesh kullanımına uygun elemanlardır. Hex mesh sistemi, diğer mesh sistemlerine nazaran daha az sayıda eleman kullanımına olanak sağlamaktadır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi küre ve sürtünme pedi elemanlarında 8 noktalı hex mesh sitemi tercih edilmiştir. Bu durum çözüm zamanını önemli ölçüde azaltmaktadır. Sonlu elemanlar sisteminde kullanılan mesh çeşitleri şekil 3.7’de görüldüğü gibidir.

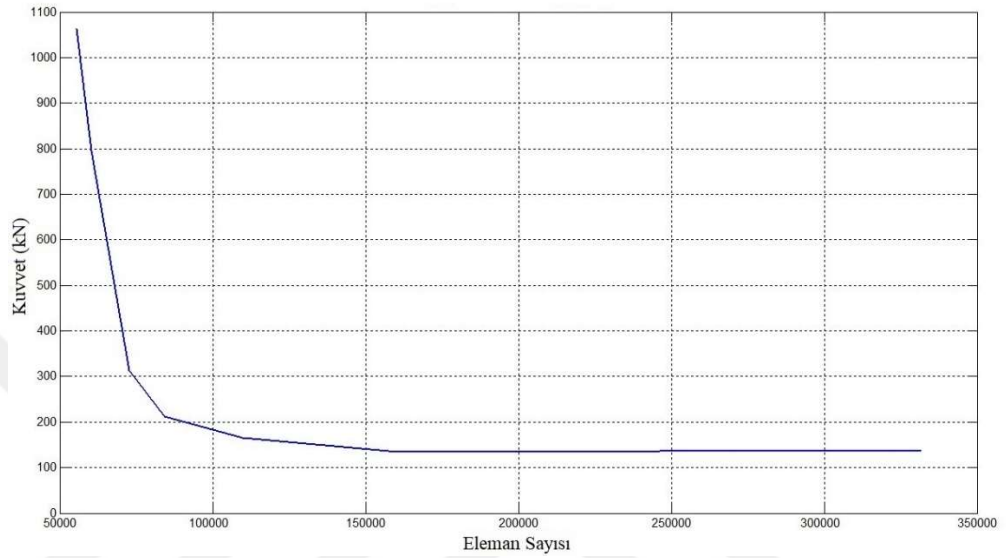


Şekil 3.6. Sönümleyici mesh görüntüsü



Şekil 3.7. Sonlu elemanlarda mesh çeşitleri [31]

Sonlu elemanlar sisteminde, analiz sonrasında doğru sonuçlara ulaşabilmek için sistemin doğru sayıda elemana bölünmesi büyük önem teşkil etmektedir. Sönümleyici üzerinde, eleman sayısının doğru tespit edilebilmesi için sürtünmeye maruz kalan elemanlar olan sürtünme pedleri ve küresel elemanların mesh aralıkları 50 mm’ den başlanarak 5 mm’ye kadar 5mm aralıklarla parçalara bölünerek şekil 3.8’de görüldüğü gibi yakınsaklık analizi yapılmıştır.



Şekil 3.8. Yakınsaklık analizi grafiği

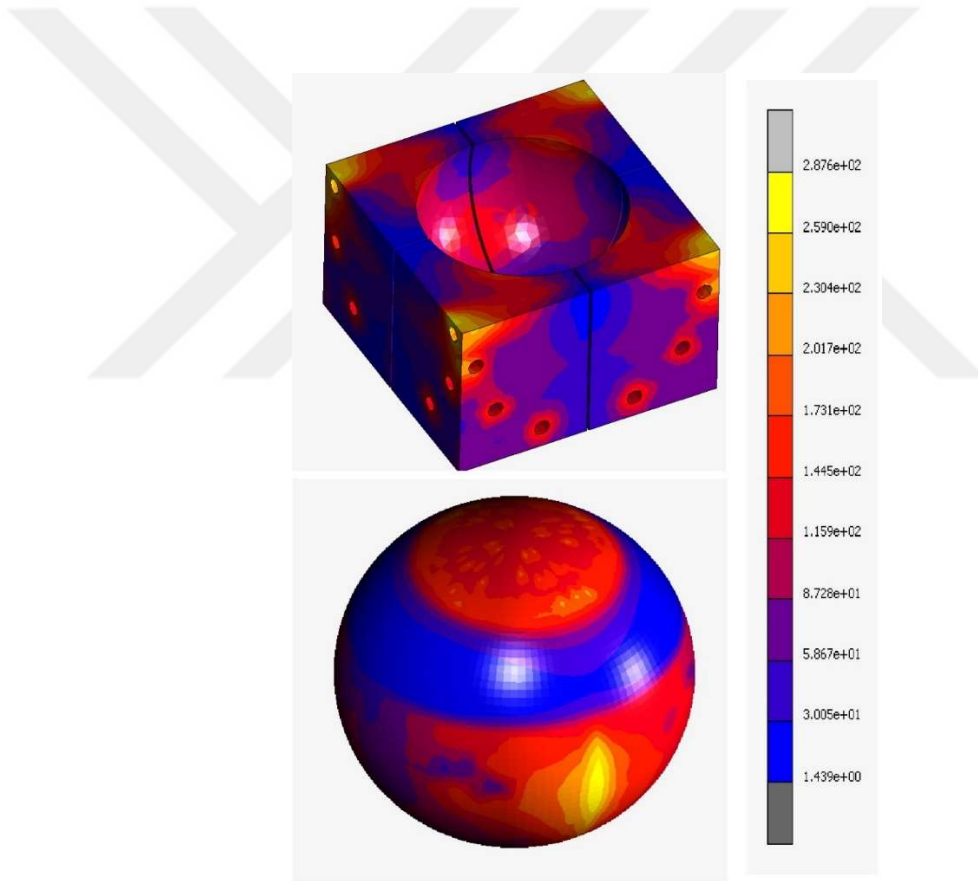
Analiz sonrasında, sürtünme pedleri ve küresel elemanın üzerinde oluşturulan 150.000 eleman ve sonrasında reaksiyon kuvvetinin dengelendiği görülmüştür. Sönümleyici üzerindeki tüm analizler en iyi sonucun alındığı 5mm mesh aralığı için yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde toplam 300.000 eleman kullanılmıştır.

Sönümleyiciyi oluşturan tüm çelik elemanlar için elastisite modülü 210.000 N/mm², poisson oranı 0,30 olarak alınmıştır. Sürtünme pedine ait mekanik parametreler tablo 3.1’de görüldüğü gibidir. Sürtünme pedi ve metal küre arasındaki sürtünme katsayısı 0,38’dir.

Tablo 3. 1. Sürtünme pedi mekanik özellikleri

Elastisite modülü E (Gpa)	Poisson oranı ν	Yoğunluk $\rho(\text{kg/m}^3)$
50.1	0.3	1880

300 kN'luk yükleme altında sönümleyicide oluşan gerilmeler von mises yöntemiyle incelendiğinde, gerilmelerin 500 N/mm²'yi aşmadığı görülmektedir. Sönümleyici kayma yükü kapasitesi 300 kN olduğunda gövde ve küre elemanlarında oluşan gerilmeler şekil 3.9'da görüldüğü gibi oluşmuştur.



Şekil 3.9. 300 kN 'luk yük altında gövde ve çelik elemanlarda oluşan von mises gerilme dağılımları

Sonlu elemanlar modeli üzerinde, cihazın sıkıştırılması amacıyla şekil 3.5 'de görüldüğü gibi 6 adet x yönünde, 6 adet y yönünde olmak üzere toplam 12 adet saplama gerdirme elemanı kullanılmıştır. Cihazın deprem anında hareket eden kısmı küre bölümüdür. Kürede oluşan reaksiyon kuvvetleri sürtünme katsayısına ve kürenin sıkıştırılma kuvvetlerinin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Saplamalara uygulanan çeşitli öngerme kuvvetleri için küre elemanda oluşan reaksiyon kuvveti sonuçları aşağıdaki gibi bulunmuştur.



3.3. Saplama Öngerme Kuvvetine Bağlı Reaksiyon Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Hesaplanması

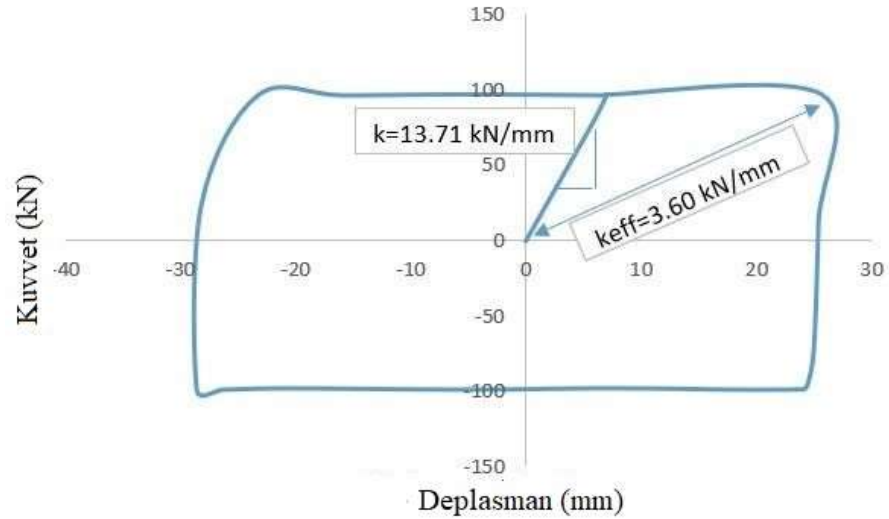
3.3.1. Saplamalara 110kN Ön-germe Kuvveti Uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri

Sonlu elemanlar modeli üzerinde yer alan saplama ön-germe elemanlarının her birine 110 kN ön-germe yükü uygulanarak sıkıştırılmış ve küre kolu 30 mm deplasman yapacak şekilde itilip çekilerek reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkileri araştırılmıştır. 110 kN ön-germe uygulanan sönümleyiciye ait uygulama koşulları tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2. 110 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları

Sürtünme Katsayısı (μ)	Ön Germe Yükü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
0.38	110	30

Sönümleyici cihaza ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, tablo 3.2’ de verilen parametreler kullanılarak yapılan analizler sonrasında elde edilen reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkisi grafiği şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. 110 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği

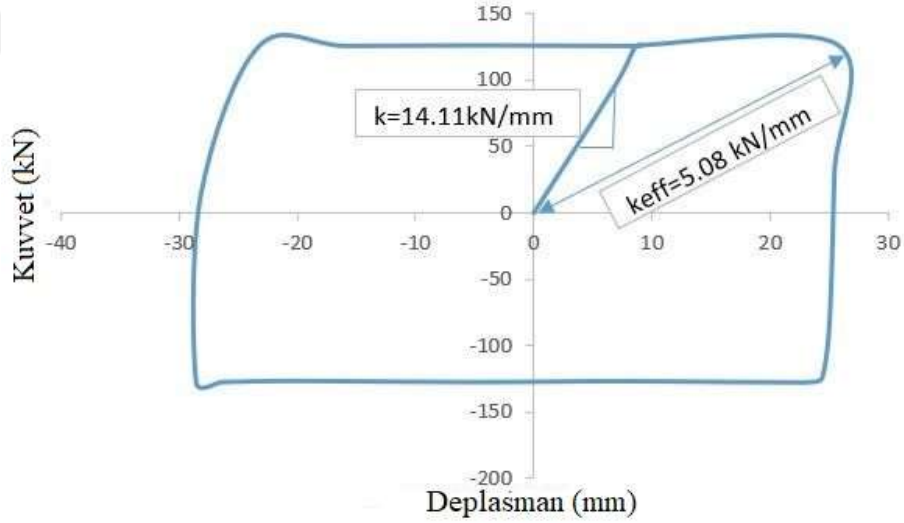
3.2.2. Saplamalara 154 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri

Sonlu elemanlar modeli üzerinde yer alan saplama ön-germe elemanlarının her birine 154 kN ön-germe yükü uygulanarak sıkıştırılmış ve küre kolu 30 mm deplasman yapacak şekilde itilip çekilerek reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkileri araştırılmıştır. 154 kN ön-germe uygulanan sönümleyiciye ait uygulama koşulları tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3. 3. 154 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları

Sürtünme Katsayısı (μ)	Ön Germe Yükü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
0.38	154	30

Sönümleyici cihaza ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, tablo 3.3’ de verilen parametreler kullanılarak yapılan analizler sonrasında elde edilen reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkisi grafiği şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. 154 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği

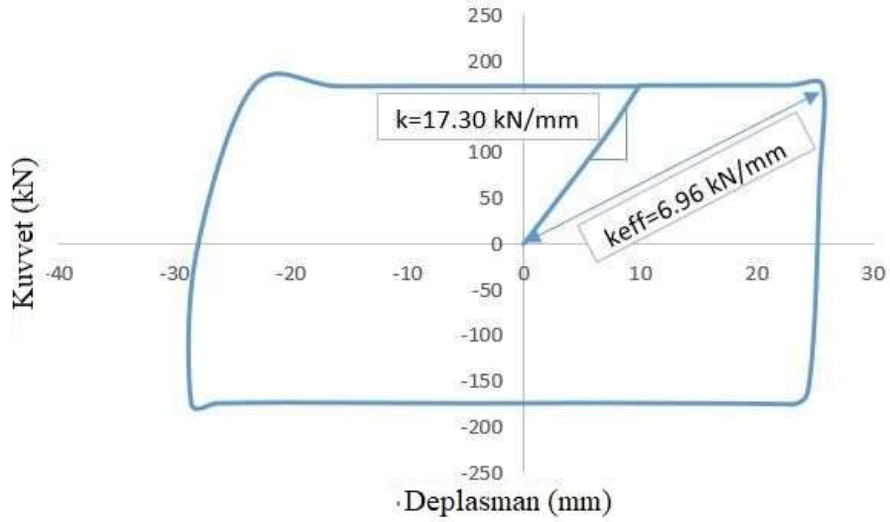
3.2.3. Saplamalara 220 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri

Sonlu elemanlar modeli üzerinde yer alan saplama ön-germe elemanlarının her birine 220 kN ön-germe yükü uygulanarak sıkıştırılmış ve küre kolu 30 mm deplasman yapacak şekilde itilip çekilerek reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkileri araştırılmıştır. 220 kN ön-germe uygulanan sönümleyiciye ait uygulama koşulları tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3. 4. 220 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları

Sürtünme Katsayısı (μ)	Ön Germe Yükü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
0.38	220	30

Sönümleyici cihaza ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, tablo 3.4’ de verilen parametreler kullanılarak yapılan analizler sonrasında elde edilen reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkisi grafiği şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. 220 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiği

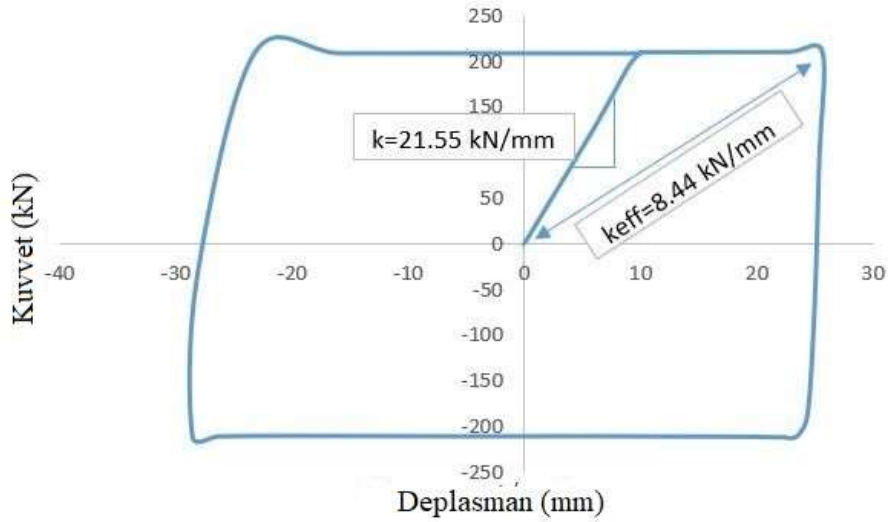
3.2.4. Saplamalara 286 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri

Sonlu elemanlar modeli üzerinde yer alan saplama ön-germe elemanlarının her birine 286 kN ön-germe yükü uygulanarak sıkıştırılmış ve küre kolu 30 mm deplasman yapacak şekilde itilip çekilerek reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkileri araştırılmıştır. 286 kN ön-germe uygulanan sönümleyiciye ait uygulama koşulları tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3. 5. 286 kN ön-germe kuvveti uygulama koşulları

Sürtünme Katsayısı (μ)	Ön Germe Yüğü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
0.38	286	30

Sönümleyici cihaza ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, tablo 3.5’ de verilen parametreler kullanılarak yapılan analizler sonrasında elde edilen reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkisi grafiğı şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. 286 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiğı

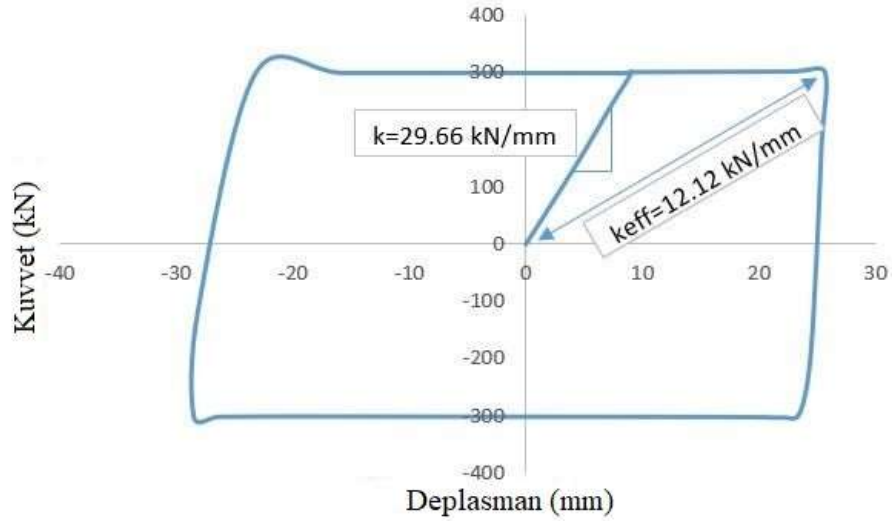
3.2.5. Saplamalara 396 kN Ön-germe kuvveti uygulanması Durumunda Oluşan Reaksiyon (Kayma) Kuvvetleri

Sonlu elemanlar modeli üzerinde yer alan saplama ön-germe elemanlarının her birine 396 kN ön-germe yükü uygulanarak sıkıştırılmış ve küre kolu 30 mm deplasman yapacak şekilde itilip çekilerek reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkileri araştırılmıştır. 396 kN ön-germe uygulanan sönümleyiciye ait uygulama koşulları tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3. 6. 396 kN ön-germe kuvveti uygulama koşullar

Sürtünme Katsayısı (μ)	Ön Germe Yüğü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
0.38	396	30

Sönümleyici cihaza ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, tablo 3.6’ da verilen parametreler kullanılarak yapılan analizler sonrasında elde edilen reaksiyon kuvveti- deplasman ilişkisi grafiğı şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14. 396 kN ön germe altında oluşan kayma yükü- reaksiyon kuvveti grafiğı

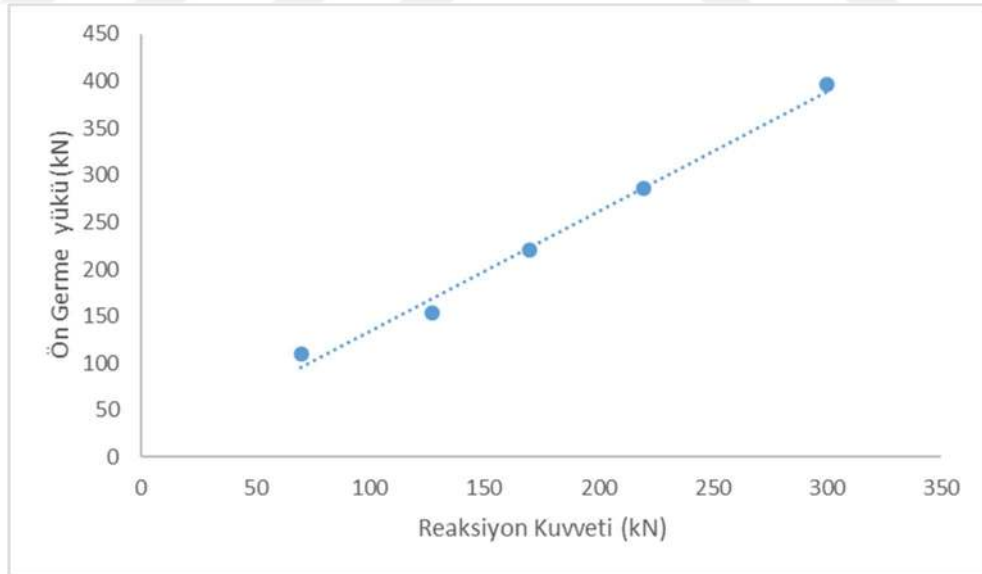
Saplamalar uygulanan ön-germe kuvvetleri karşısında sürtünme küresinde oluşan reaksiyon kuvvetleri toplu olarak tablo 3.7’de gösterildiği gibidir.

Tablo 3. 7. Saplama ön-germe -Reaksiyon kuvveti

Ön- Germe Kuvveti (kN)	Reaksiyon Kuvveti (kN)	Maksimum Deplasman (mm)
110	70	30
154	127	30
220	170	30
286	220	30
396	300	30

Şekil 3.15’de görüldüğü gibi ön germe değerlerine karşılık oluşan reaksiyon kuvvetleri lineer olarak değişmektedir. Bu durum bize denklem 3.10’u kullanarak ara değerlerin veya istenilen herhangi bir ön germe değerine karşılık reaksiyon kuvvetini hesaplamamıza olanak sağlamaktadır.

$$\text{Reaksiyon kuvveti} = (\text{Ön Germe Kuvveti}) / (\text{tg } (\alpha)) \quad (3.10)$$

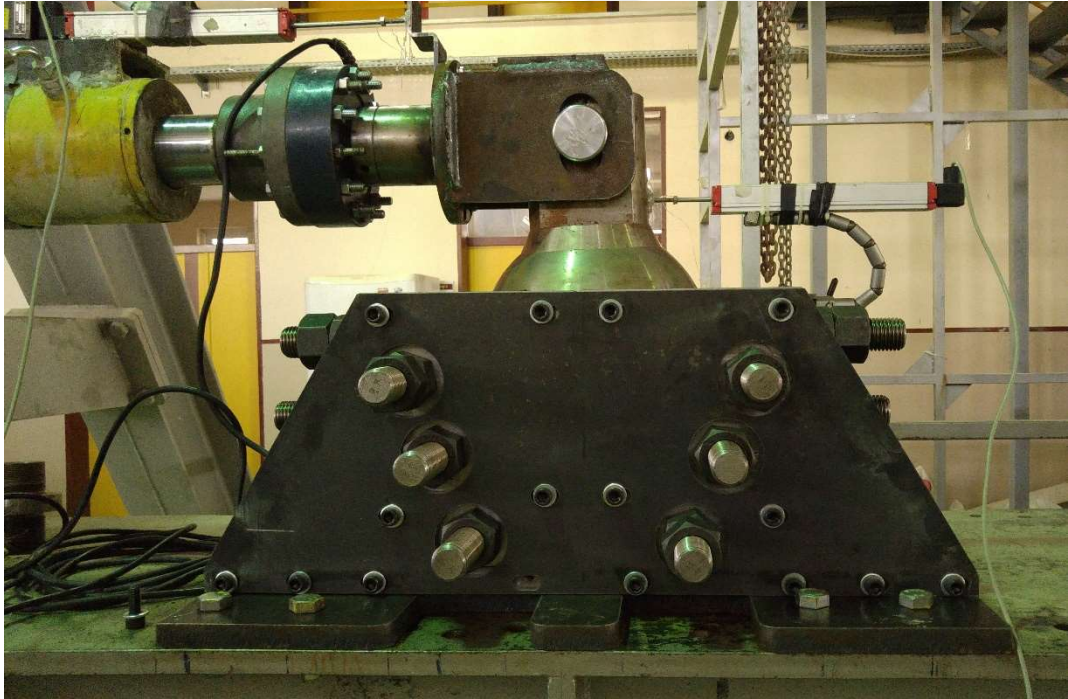


Şekil 3.15. Ön-germe yükü- reaksiyon kuvveti grafik gösterimi

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Materyal

Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyiciyi oluşturan çelik parçaların tamamı sonlu elemanlar gerilme analizlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek seçilmiştir. Sürtünme pedinin mekanik özellikleri imalatçı firmadan tedarik edilip laboratuvar ortamında yük altındaki davranışı incelenmiştir. Deneyler, Ege Üniversitesi yapı laboratuvarında yer alan yükleme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Cihazın saplama elemanlarına 5 farklı ön germe kuvveti uygulanmıştır. Her bir yükleme durumu için farklı frekanslarda itme ve çekme testleri yapılmış ve cihaz davranışı üzerine veriler toplanmıştır. Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyiciye ait görüntü şekil 4.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.1. Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici

4.2. Yöntem

4.2.1. Çelik malzemesi akma dayanımının belirlenmesi

Yapılan sonlu elemanlar çalışmaları sonucunda 300 kN'luk kayma yükü değerine sahip bir sönümleyici için küre ve gövde elemanlarında oluşan gerilme dağılımlarının şekil 3.9'da görüldüğü gibi 300 N/mm² yi geçmediği belirlenmişti. Bu sebepten dolayı sönümleyiciye ait çelik elemanların yük altında hasar görmemeleri için kimyasal bileşenleri tablo 4.1'de verilen AISI4140 ıslah çeliği tercih edilmiştir.

Tablo 4. 1. AISI4140 Çeliği kimyasal birleşimleri [32]

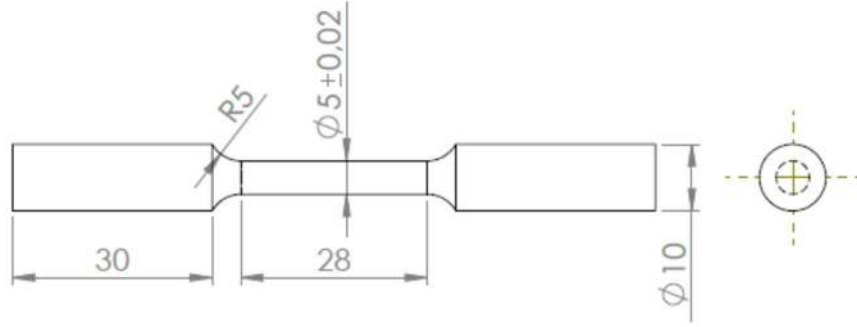
Ana Malzeme	Kimyasal birleşim (% Ağırlık)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Diğerleri
AISI 4140	0.4	0.23	0.825	1.1	0.016	97.07	a) 0.019(Al); 0.007 (Co); 0.01 (Cu) b) 0.001 (Nb); 0.002 (Ti); 0.004 (V); c) 0.014 (P); 0.022 (S)

Çeliğe ısıtıl işlem uygulanarak HRC-33 sertliğine getirilmiş ve malzemeyi temsil eden üç adet deney numunesine çekme deneyi uygulanmıştır.

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile yapılır. Çekme deneyi numunesi için gerekli şartlar TS 138 EN 10002-1/2004 standartlarında belirlenmiştir. Deney numunesine tek eksenle kopuncaya kadar sabit hızda kuvvet uygulanır. Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait bazı özellikler bulunabilir. Bunlardan bir kısmı aşağıdaki gibidir [33].

- Çekme Dayanımı
- Akma Dayanımı
- % Uzama

Dokuz Eylül Üniversitesi metalürji ve malzeme mühendisliği laboratuvarında boyutları şekil 4.2’de görülen 3 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Deney 250 kN çekme kapasitesine sahip Shimadzu isimli deney aracında gerçekleştirilmiştir. Deney aracı ve numunelere ait görseller şekil 4.3’de görülmektedir.



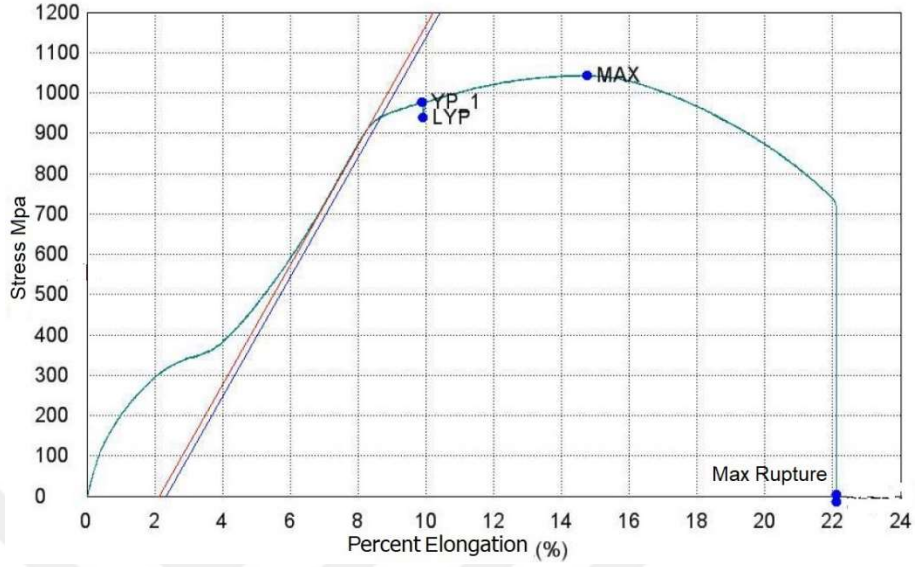
Şekil 4.2. Çekme testi için numune boyutları



Şekil 4.3. Çekme deneyi

Çekme işlemi sonrasında, Şekil 4.4’de görüldüğü gibi AISI 4140 çeliğin akmaya başladığı gerilme değerinin 935 Mpa, maksimum akma değerinin ise 1043 Mpa olduğu belirlenmiştir. Bu durum sonlu elemanlarla yapılan analizler sonrası elde edilen 300 Mpa’lık gerilme değerinden çok daha fazla olduğu için seçimin uygun

olduğu anlaşılmaktadır. Malzemenin elastisite modülü 210.000 N/mm² poisson oranı 0.30 dur.



Şekil 4.4. Çekme deneyi akma gerilmesi- % uzama ilişkisi

4.2.2. Sürtünme Pedlerinin Basıç Altında Davranışının Tespit Edilmesi

Temel olarak toz metalürjisi ile üretilen sürtünme pedleri, karıştırma, kalıplama ve sinterleme basamaklarından geçerek elde edilmektedirler. Sürtünme pedi içeriğini oluşturan malzemeler öncelikle homojen şekilde belli bir süre karıştırılırlar. Bu karışım daha sonra belli bir basınç, sıcaklık ve sürede, ped şeklindeki kalıp içine preslenmektedirler. Presleme işlemi sonrası kalıbın şeklini almış karışım, sinterleme fırınında belirli bir sıcaklık ve süre ile ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır. Isıtılma işlemi sonrası soğutulan ped örneği, kullanım öncesi testler için hazır konuma gelmiş olur [34].

Sürtünme pedlerinin yerleştirileceği yüzey küresel olduğu için seçilen pedin esnek olması gerekmektedir. Piyasada teknik ve mekanik özellikleri bilinen pek çok marka mevcuttur. Esnek bir yapıya sahip olmaları nedeni ile deneyler için 4 ve 5 mm kalınlığında 40mm genişliğinde kauçuk esaslı pedler tercih edilmiştir. 50x50 mm ebatlarındaki pedlere 500 kN'dan başlamak üzere 1000 ve 1500 kN'luk kuvvetler uygulanmış ve her bir uygulamadan sonra pedlerde oluşan deformasyonlar incelenmiştir.

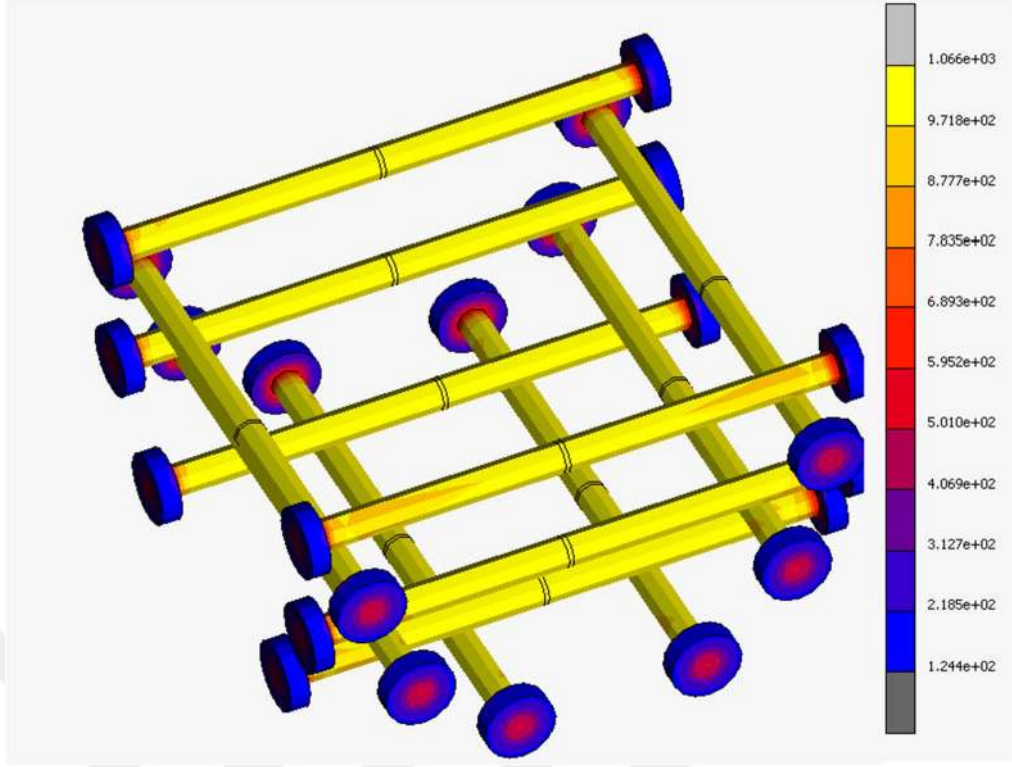
Şekil 4.5’de görüldüğü gibi 600 Mpa’lık gerilme altında sürtünme pedinde kayda değer bir deformasyon oluşmamıştır. Sürtünme pedinin sürtünme katsayısı (μ) üretici firmadan 0,38 olarak alınmıştır. Pedlere ait diğer mekanik özellikler tablo 3.1’den görülebilir.



Şekil 4.5. Sürtünme pedlerinin yük altında davranışı

4.2.3. Saplama- Gerdirme Elemanlarının Gerilme Açısından İncelenmesi

Sonlu eleman analizleri ile yapılan çalışmalarda von mises yöntemi ile gerilme dağılımları incelendiğinde saplama gerdirme elemanlarının 500 ile 1000 N/mm² lik gerilmelere maruz kaldığı görülmektedir. Saplama gerdirme elemanlarına ait von mises gerilme dağılımı şekil 4.6’da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.6. Saplama gerdirme elamanlarına ait von mises gerilme dağılımı

Gerilme değerleri göz önüne alındığında, M36, 10.9 kalitesinde saplama gerdirme elemanları tercih edilmiştir. Üreticinin HRC 35-37 sertliğindeki saplama gerdirme elemanlarına yaptığı testlerde akma mukavemetini 1036 N/mm^2 , kopma mukavemetinin ise 1106 N/mm^2 olarak tespit etmiştir.

4.3. Mafsal Özellikli Sürtünme Tipi Sismik Sönümleyicinin Deney Düzenekinin Oluşturulması

Sönümleyicinin farklı hız ve kapasitelerdeki performansını en iyi şekilde görebilmek için deneyler, Ege Üniversitesi yapı laboratuvarında yer alan reaksiyon duvarında yapılmıştır. Çelik çerçeveli sistem (1) olarak tasarlanmış reaksiyon duvarında yatayda 300 kN çekme, 500 kN itme kapasitesine sahip bir piston (2) bilgisayar kontrollü olarak farklı hızlarda itilip çekilebilmektedir. Reaksiyon duvarına ait görüntü şekil 4.7’de yer almaktadır.



Şekil 4.7. Reaksiyon duvarı

4.3.1. Sönümleyiciye ait Saplama Sıkıştırılması

Deneysel çalışmada, sönümleyiciye ait saplama gerdirmeye elemanlarının farklı kuvvetlerle sıkılarak reaksiyon-deplasman ilişkilerinin araştırılması ve farklı frekanslarda davranış değişikliklerin gözlemlenmesi amaçlandığından, sıkıştırma işleminin kritik bir öneme sahip olduğu görülmektedir. Saplama gerdirmesi için şekil 4.8’de görülen saplama gerdirmeye seti kullanılmıştır.

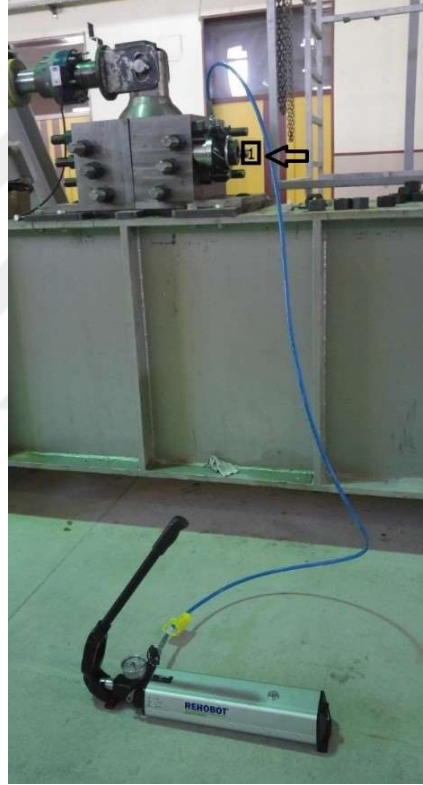


Şekil 4.8. Saplama gerdirmeye seti

Şekil 4.8’de görülen saplama gerdirme setinde;

- a) 660 kN M36 gerdirme somun tutucu & köprü seti
- b) 660 kN kapasiteli yay dönüşlü saplama gerdirme pistonu
- c) 1500 bar çift hızlı hidrolik test pompası ye almaktadır.

Köprü seti vasıtasıyla saplama gerdirme pistonu sönümleyiciye ait M36 saplamalara yerleştirilir, 1800 bar kapasiteli hortum vasıtasıyla piston ve hidrolik test pompası birbirine bağlanır. Saplama gerdirme seti-sönümleyici cihaz bağlantı şekli şekil 4.9’da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.9. Saplama gerdirme seti- sönümleyici bağlantısı

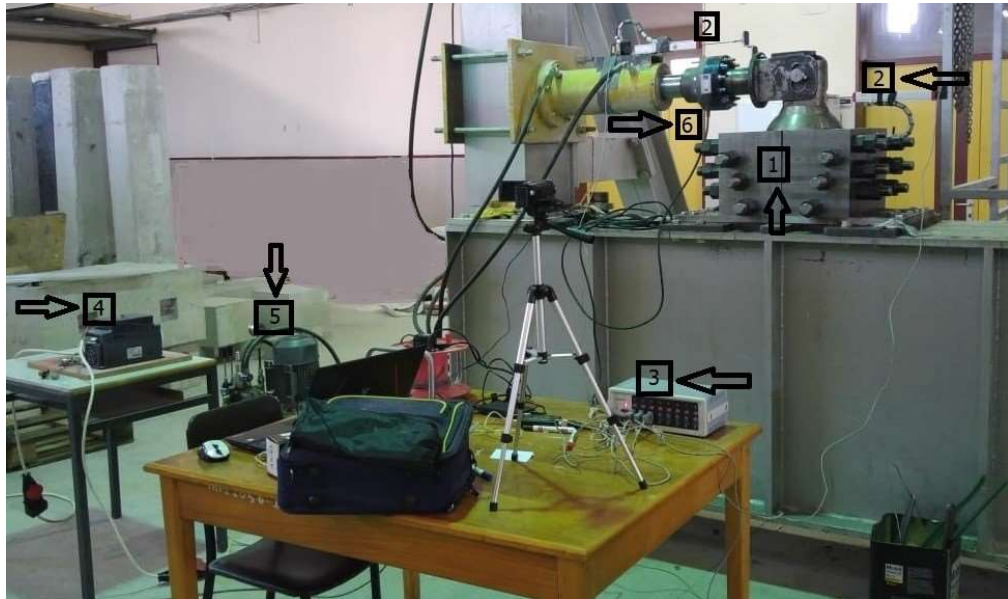
Saplamalar üzerinde oluşan gerilmeler test pompası üzerinde yer alan sayaçtan bar birimi ile okunabilmektedir. Üretici firmadan temin edilen basınç-kuvvet dönüşümü tablosu (Tablo 4.2) yardımıyla ön germe değerleri kuvvet birimi olarak takip edilebilmektedir.

Tablo 4. 2. Basınç-kuvvet dönüşüm tablosu

Basınç	Kuvvet	Tonaj	Basınç	Kuvvet	Tonaj
Bar	kN	Kg/Kuvvet	Bar	kN	Kg/Kuvvet
50	22	2.243	800	352	35.894
100	44	4.486	850	374	38.137
150	66	6.73	900	396	40.38
200	88	8.973	950	418	42.624
250	110	11.216	1000	440	44.867
300	132	13.46	1050	462	47.11
350	154	15.703	1100	484	49.354
400	176	17.947	1150	506	51.597
450	198	20.19	1200	528	53.841
500	220	22.433	1250	550	56.084
550	242	24.677	1300	572	58.327
600	264	26.92	1350	594	60.571
650	286	29.163	1400	616	62.814
700	308	31.407	1450	638	65.057
750	330	33.65	1500	660	67.301

4.3.2. Deneyler için Veri Toplama Setinin Hazırlanması

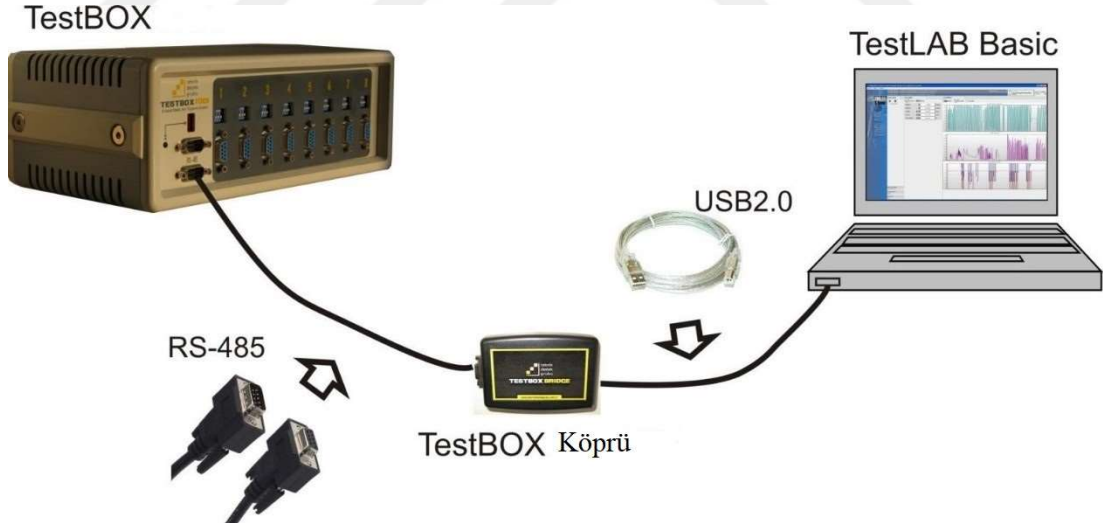
Sönümleyiciye ait saplamaların farklı öngerme değerlerinde sıkıştırılması ile elde edilen reaksiyon kuvvetlerinin deplasmana bağlı grafikleri şekil 4.10'da görülen deney seti yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Deney seti

Şekil 4.10'da görülen deney setinde, reaksiyon duvarı üzerine yerleştirilen sönümleyicinin (1) küresel kısmının reaksiyon duvarına ait piston yardımı ile belirli frekanslarda ileri ve geri hareket ettirilmesiyle oluşan deplasman değerleri deplasman ölçerler (2) vasıtasıyla ölçülmektedir. Pistonun itilmesi ve çekilmesi esnasında sönümleyiciye ait kürede oluşan reaksiyon kuvvetinin ölçümü yük hücresi (6) vasıtasıyla yapılmıştır. Güç ünitesinde (5) üretilen enerji piston üzerinde dengesiz bir hız oluşturmaktadır. Bu hızı kontrol altına alabilmek için sisteme hız kontrol ünitesi (4) eklenmiştir. Deneyler esnasında oluşan deplasman ve reaksiyon kuvvetlerine ait veriler Test-box (3) cihazında toplanarak sonuçlar anlık olarak bilgisayar ekranından takip edilerek kayıt altına alınabilmektedir.

Şekil 4.11'de yer alan Testbox veri toplama sistemi, genel olarak veri toplama üzerine mevcut sorunları çözebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Sistemde, üzerinde 8 adet giriş bulunan ve kendi içinde bağımsız çalışan TestBOX şasesi ve bu şaselere tümleşik analog sinyal işleme (ASI) devreleri bulunur. TestBOX'dan toplanan veriler TestBOX BRIDGE yardımı ile USB üzerinden bilgisayara aktarılır [35].



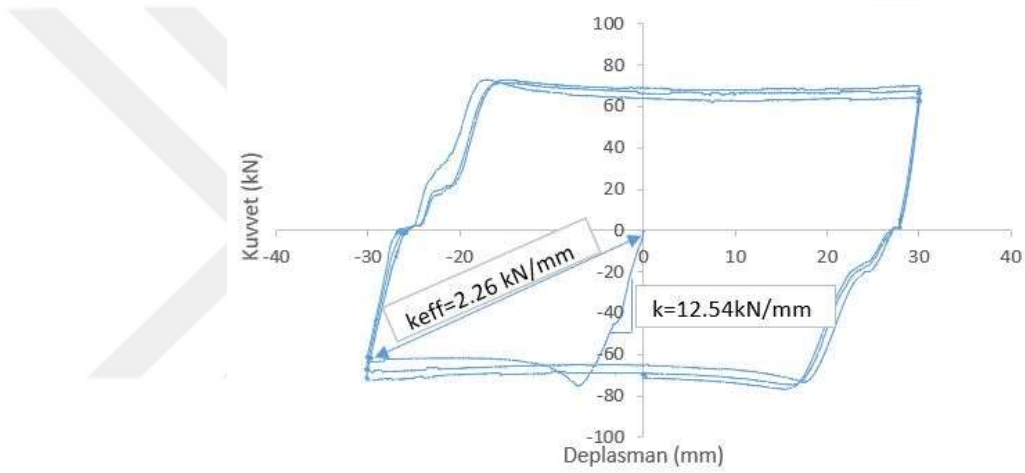
Şekil 4.11. Testbox cihazı kurulum şeması [35]

4.4. Deneyler Sonuçları

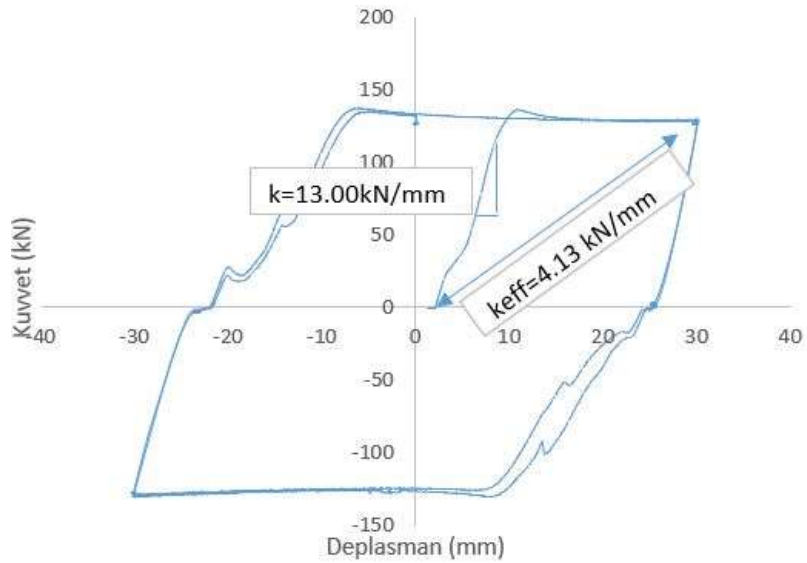
Sönümleyicinin farklı kuvvetler altında sıkılması ile elde edilen reaksiyon-deplasman grafikleri, cihazın yük altında davranış biçimi hakkında önemli ip uçları vermektedir. Saplama gerdirme elemanlarına 110, 154, 220, 286 ve 396 kN'luk sıkma kuvveti uygulanarak elde edilen reaksiyon- deplasman grafikleri tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4. 3. Deneylerden elde edilen, saplama ön germe- deplasman ilişkisi

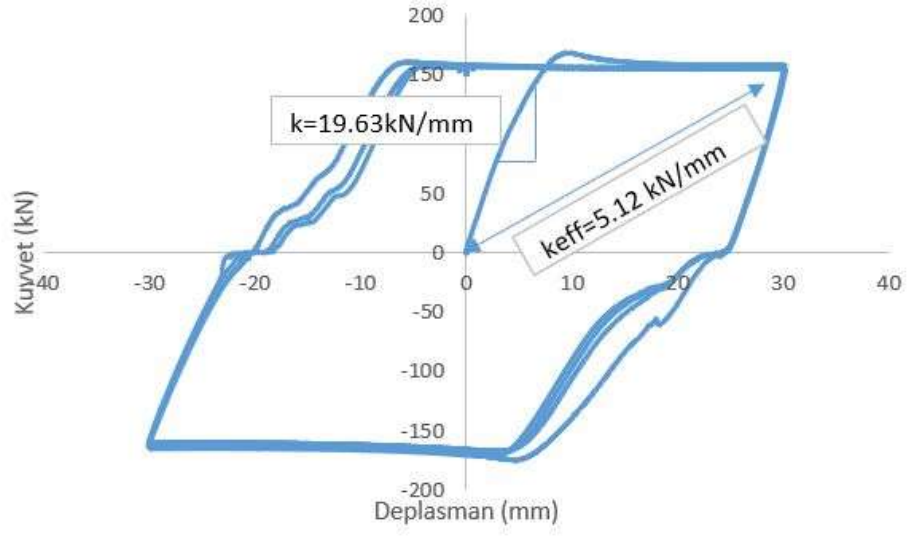
110 kN sıkıştırma durumu



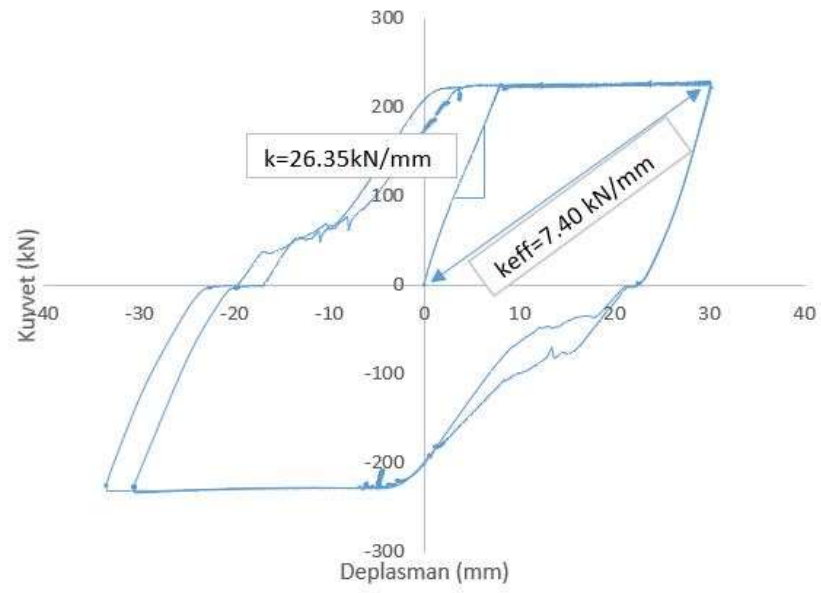
154 kN sıkıştırma durumu



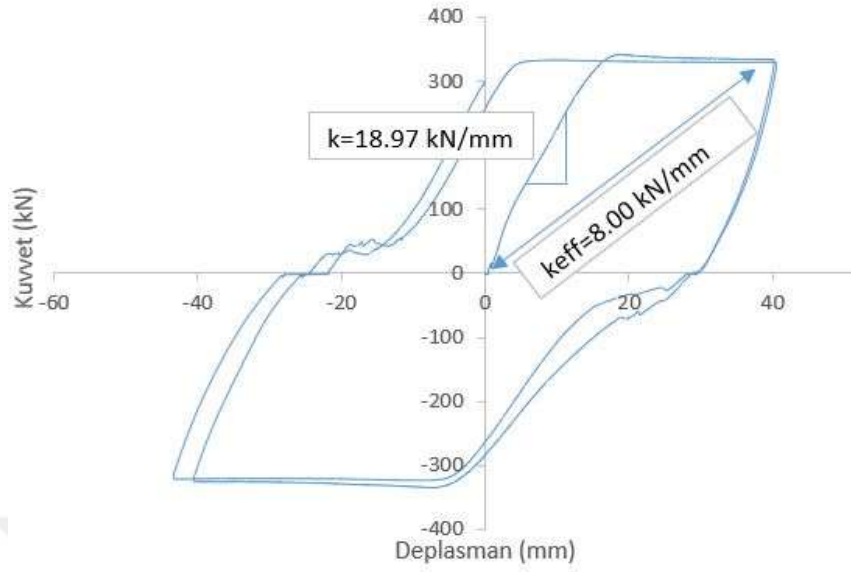
220 kN sıkıştırma durumu



286 kN sıkıştırma durumu

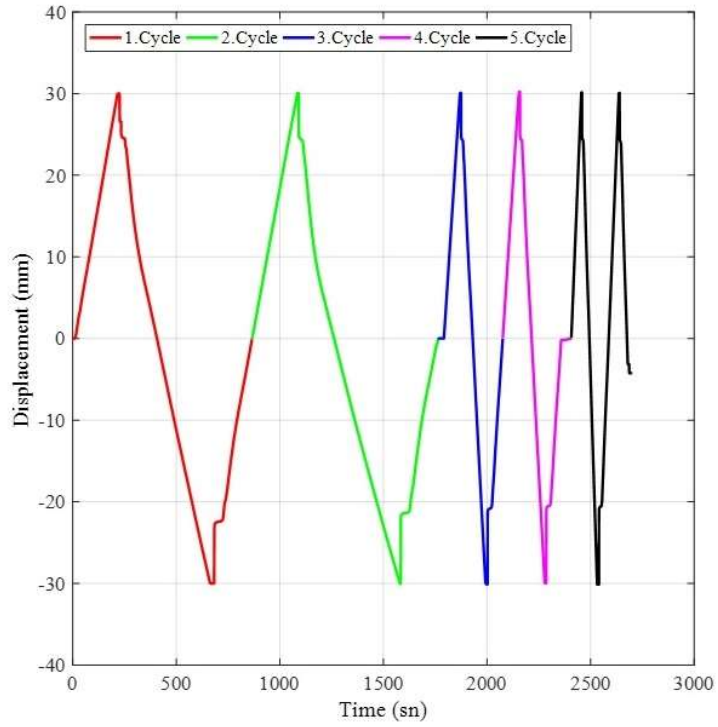


396 kN sıkıştırma durumu



Tablo 4.3’de açıkça görüldüğü gibi sıkıştırma yüklerinin arttırılması ile reaksiyon kuvvetleride artmaktadır. Deneyler 30mm deplasman değerleri için yapıldığı için reaksiyon kuvvetlerinin artması ile efektif gerilmelerde ($keff$) doğru orantılı olarak artmaktadır.

Sönümleyicinin farklı frekanslar altında davranışını görmek üzere 220 kN’luk kuvvetle sıkılan cihaz şekil 4.12’de görüldüğü gibi farklı periyotlarda çalıştırılmış ve şekil 4.13’de verilen reaksiyon kuvveti – deplasman grafiği elde edilmiştir.

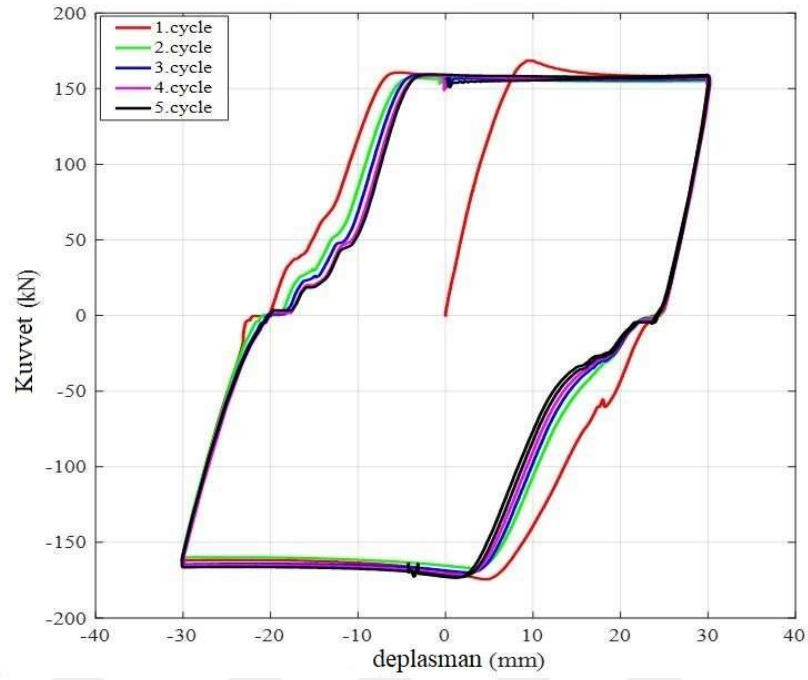


Şekil 4.12. Sönümleyicinin farklı periyotlar altında çalıştırılması ile oluşan deplasman- zaman grafiği

Cihazın frekans değerleri kademeli olarak arttırılmıştır. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi ilk 2 periyot için frekans değerleri 0.001Hz iken 3. Periyot için 0.003 Hz, dördüncü ve beşinci periyotlar için 0.005 Hz. olarak alınmıştır.

Farklı frekanslar altında test edilen sönümleyicinin reaksiyon kuvveti değerinin hiçbir şekilde değişmediği şekil 4.13’de açıkça görülmektedir. Bu durum cihaza ait reaksiyon kuvvetlerinin frekanstan bağımsız olarak oluştuğunu göstermektedir.

Sönümleyiciye ait reaksiyon kuvveti değerlerinin farklı frekans değerleri ile değişmemesi, farklı frekanslara sahip olan depremlerde yapı davranışının değişmeyeceği anlamına gelmektedir. Bu durum sürtünme tipi sönümleyici cihaz kullanılan yapılarda büyük avantaj sağlamaktadır.



Şekil 4.13. Farklı frekanslar altında sönümleyici kuvvet- deplasman ilişkisi grafiği

Sürtünmeden dolayı, Sürtünme pedleri ile sürtünme yüzeyi arasında ısı oluşur [36]. Oluşan enerji bir formdan başka bir forma dönüşerek sönümlenir [37]. 220 kN kapasiteli sönümleyici cihaz farklı periyotlarda beş döngü oluşturacak şekilde çalıştırılmıştır. Sönümleyicinin kuvvet deplasman grafiği (şekil 4.13) ısı açısından değerlendirildiğinde, her döngü için kayma yükü (reaksiyon kuvveti) değerinin sabit kalması, ısının sürtünme tipi sönümleyicilerin histerik davranışını etkilemediğini göstermektedir.

5. MAFSAL ÖZELLİKLİ SÜRTÜNME TİPİ SİSMİK SÖNÜMLEYİCİ'NİN YAPI ÜZERİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

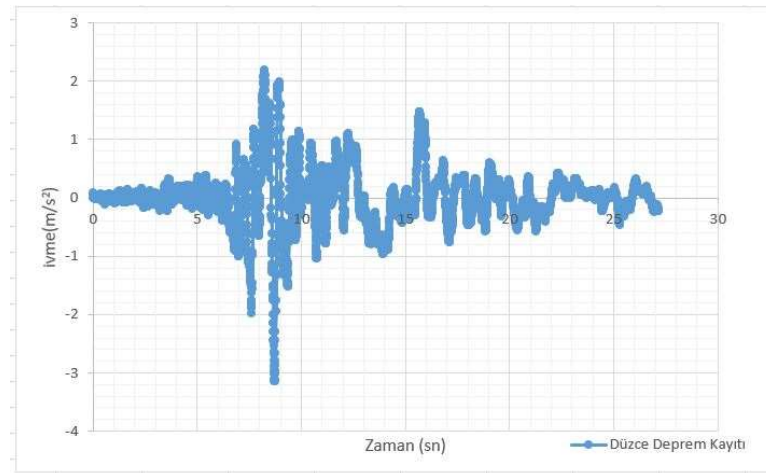
5.1. Sönümleyici Cihaz Kullanılan ve Kullanılmayan İki Katlı Özdeş İki Bina için Deplasman ve Periyot Karşılaştırmaları

Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyicinin yapı üzerindeki davranışlarını görmek üzere, sap 2000 programı kullanılarak aynı malzeme, yük ve ölçülere sahip 2 katlı iki yapı modeli oluşturulmuştur. Yapıdan bir tanesinde sönümleme sistemi kullanılmış diğesinde kullanılmamıştır. Yapılara öncelikle düzce deprem kayıtları tanımlanarak zaman tanım alanında (Time History) analiz yapılmış ve iki binanın çatı deplasmanları kıyaslanmıştır.

Zaman tanım alanında analiz, seçilen ve kaydedilen üç olaydan az olmamak üzere ölçeklendirilen uygun yatay yer hareketleri ve zaman geçmişi bileşen çiftleri ile gerçekleştirilmektedir [38].

Yapı performanslarını görmek üzere, İtme analizi (Pushover) yapılan yapıların performansı ve taban kesme kuvveti taşıma kapasiteleri kıyaslanmıştır.

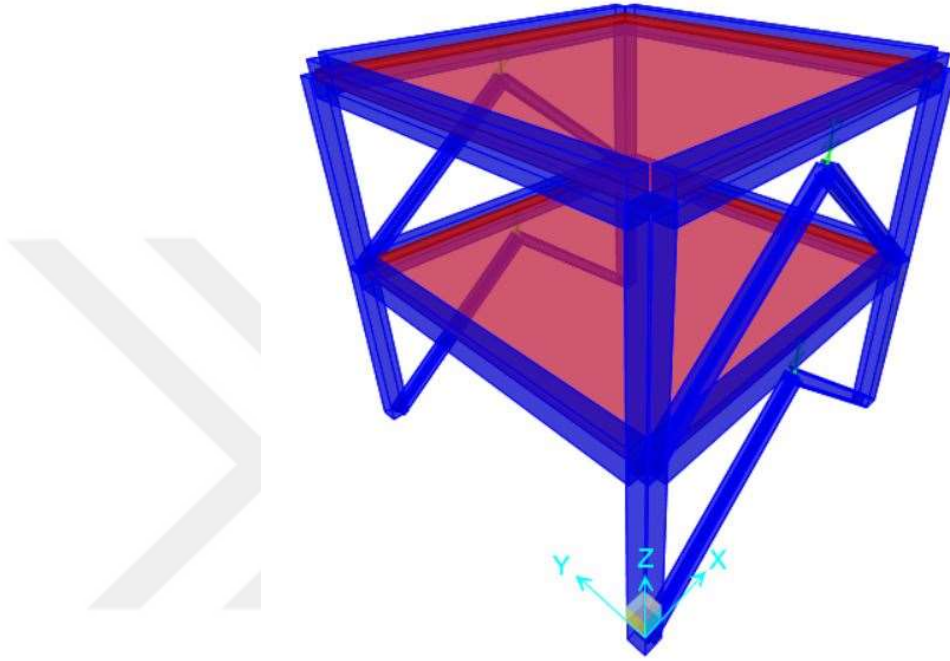
Bu kapsamda, sönümleme sistemine sahip yapıda mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyiciyi temsil edecek olan non-linear link elemanlar tanımlanmıştır. Yapıya gelen deprem yükünü temsil etmesi için, yapı şekil 5.1'de gözüken Düzce kuzey- güney deprem kayıtları kullanılarak analiz edilecektir.



Şekil 5.1. Düzce kuzey- güney deprem kayıtları

5.1.1. Yapı Modelinin Oluşturulması

şekil 5.2’de görölen tasarım yapısı, x ve y yönlerinde 6 metre genişliğinde kat yüksekliği 3 metre olacak şekilde modellenmiştir. Sönümleme cihazları, yapının dış çerçevesine ters V şekilli olarak yerleştirilen çapraz sistemlerin üzerine yerleştirilmiştir.



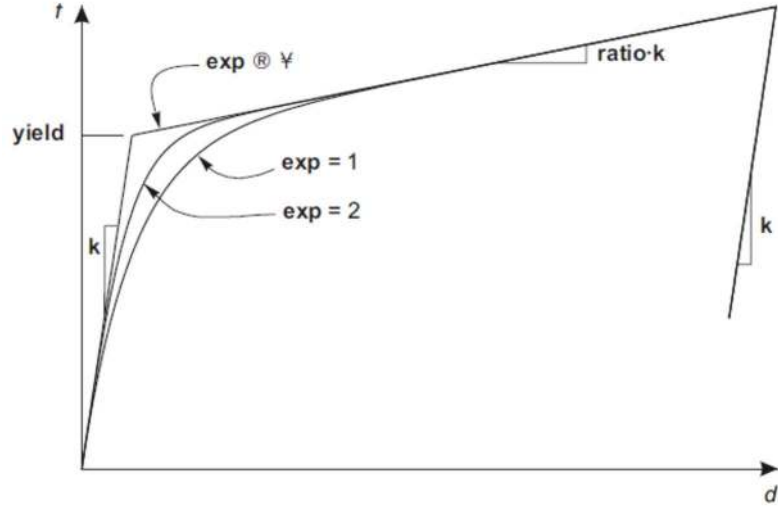
şekil 5.2. Sönüm sistemli yapı

5.1.2. Link Eleman Tanımları

Sönümleyicilerin davranışlarını temsil etmesi için plastik wen link eleman modeli kullanılmıştır.

5.1.3. Wen Plastik Özellikleri

Her bir deformasyon serbestlik derecesi için tek eksenli plastik özellik tanımlanabilir. şekil 5.3’de görölen plastik model, Wen tarafından geliştirilen (1976) histerik davranış modeline dayanmaktadır. Wen plastik özelliği için bütün iç deformasyonlar bağımsızdır. Bir serbestlikte oluşan akmlar diğer deformasyon davranışlarını etkilemez. Eğer bir serbestlik derecesi için nonlinear bir özellik tanımlanmamışsa o serbestlik derecesinde lineerdir ve efektif rijitli sıfır alınabilir [39].



Şekil 5.3. Wen plastik özelliği için parametrelerin gösterimi [39]

Non lineer kuvvet deplasman ilişkisi aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

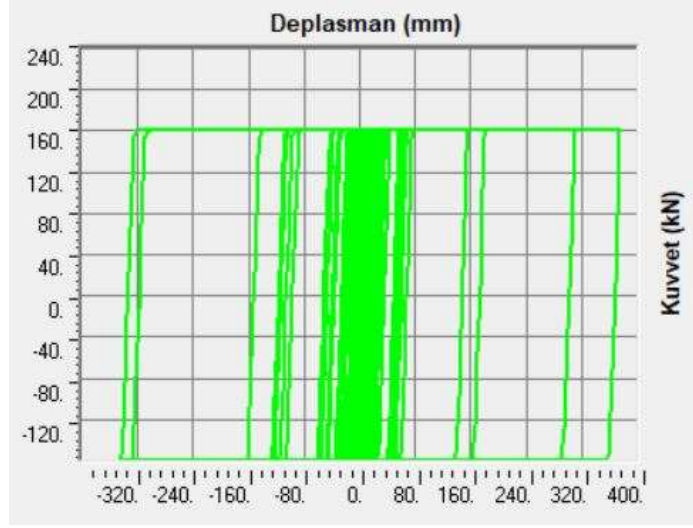
$$f = \text{ratio } k d + (1 - \text{ratio}) \text{ yield } z \quad (5.1)$$

Burada, (K) elastik yay sabiti, (yield) akma kuvveti (kayma kuvveti), elastik rijitlik (k) için akma sonrası rijitlik oranı belirlenebilir. z, bir iç histerik değişkenidir ve bu değişken $|z| \leq 1$ şeklinde tanımlanmaktadır. z' nin ilk değeri sıfırdır ve bu değer diferansiyel denklemler vasıtasıyla türetilir [39].

$$\dot{z} = \frac{k}{\text{yield}} \begin{cases} \dot{d} (1 - |z|^{\text{exp}}) & \text{if } \dot{d} z > 0 \\ \dot{d} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.2)$$

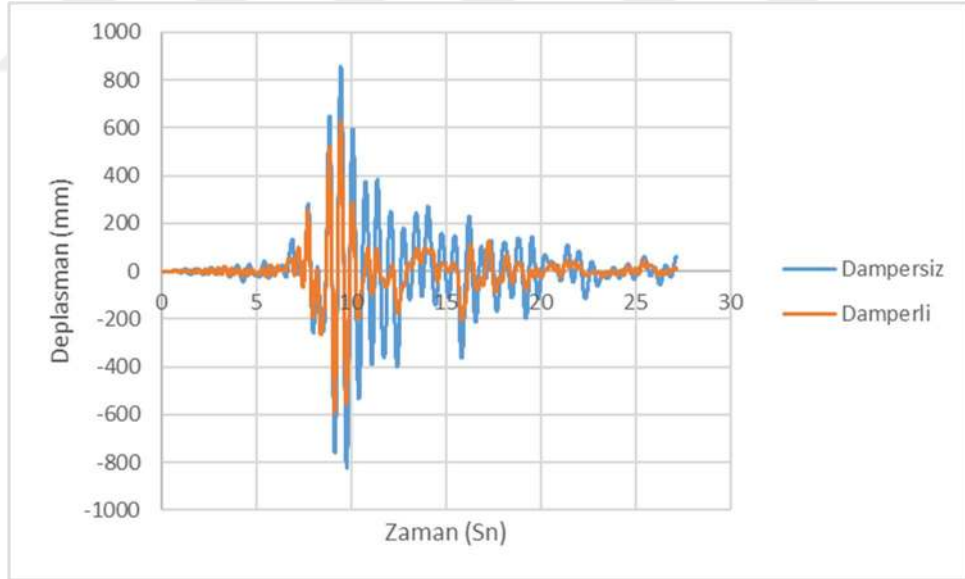
Burada, exp üstel bir sayıdır ve bu değerin büyük olması şekil 5.3'de görüldüğü gibi akmanın keskinleşmesine sebep olur. Pratik olarak exp= 2 olarak kabul edilir [39].

Yapıya x yönünde deprem kuvvetlerini absorbe etmesi için mafsal özellikli Sürtünme tipi sönümleyiciyi temsil eden toplam 4 adet sönümleyici monte edilmiştir. Zemin ve 1. katta 160 kN akma kapasiteli sönümleyiciler şekil 5.4'de görüldüğü gibi link eleman olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.4. 160 kN kapasiteli sönümleyici grafiği (kN/mm)

Sönümleyici cihaza sahip olan ve olmayan yapılar, deprem yükleri altında analiz edilmiş ve belirli bir zaman aralığında çatı deplasmanları ölçülerek genlik değerleri Şekil 5.5’de görüldüğü gibi kıyaslanmıştır.



Şekil 5.5. Sönümleyicili ve sönümleyicisiz yapıların çatı deplasmanlarının kıyaslanması

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi damperli sistemin genliği daha düşüktür. Genlikteki düşüş kullanılan sönümleyici cihaz adedi ve kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Yapıların periyotları kıyaslandığında sönüm sistemi kullanılmayan

yapıda periyot 0,62 saniye iken sönüm sistemi kullanılan yapıda 0,52 saniye olarak ölçülmüştür.

5.2. Performans Analizi

Deprem sonrasında yapılar elastik sınırın ötesine geçebilmektedir. Doğrusal analiz yöntemleri ile elasto plastik davranış açıklanamayacağından bu davranışı açıklayabilmek için doğrusal olmayan yöntemler geliştirilmiştir [40]. Yapıların performans düzeyleri nonlinear itme analizi (Pushover) yöntemiyle belirlenecektir.

5.2.1. İtme Analizi (Pushover)

Nonlinear statik itme (pushover) analiz yapının yatay deformasyon ve mod deformasyon ölçücümü için kullanılır. Bu konuda sabit yatay yük profilleri, uyarlamalı ve çok modlu yaklaşımların kullanılması gibi çeşitli teknikler önerilmiştir. İtme analizi teknikleri yapı sisteminin bütün karakteristikleri üzerine kullanışlı bilgiler vermektedir. Analizde öngörülen bir yükleme kullanıldığı için dinamik yanıtta yaşanan potansiyel yükleme aralığını temsil edemez. İtme analizlerinden elde edilen sonuçlar, nonlinear olması beklenen deprem yer hareket tepkilerini yansıttığı için en iyi yaklaşımdır. Rijitliği ve dayanımı olmayan süreksiz sistemler için itme analizinin uygulanabilirliği çok uygun değildir. Çok yönlü çökme mekanizması olan yerlerde mekanizma dayanımı iyi dağıtılamadığı için sonuçlar yanıltıcı olabilir veya farklı davranış modları oluşabilir [41].

İtme analizi tekniği, eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemlerin kullanımında tepe deplasmanlarının tahmin edilmesinde kullanışlı bir yöntemdir. Yüksek modların deplasmana tipik olarak küçük veya önemsiz bir katkısı olmasına rağmen, kat driftlerini, plastik mafsalları, rotasyonlarını, kat kesmelerini ve devirme kuvvetlerini önemli ölçüde etkileyebilir [41].

5.2.1.1. Performans Seviyeleri

Performans seviyeleri, deprem sonrası yapıda oluşan hasarların durumu, can güvenliği tehdidi oluşturup oluşturmadığı ve depremden sonra kullanılıp kullanılamayacağı durumlarını belirler. Performans seviyeleri öncelikle yapısal ve yapısal olmayan sistemler için ayrı ayrı bulunur. Hedef Performans seviyesi yapısal ve yapısal olmayan tüm kombinasyonları olarak belirlenir [42]

Tablo 5. 1. Yapı performans seviyeleri [42]

Yapı Performans Seviyeleri						
Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri	Yapısal Performans Seviyeleri					
	SP-1 Hemen Kullanım	SP-2 Kontrolü Hasar Aralığı	SP-3 Can Güvenliği	SP-4 Sınırlı Güvenlik Aralığı	SP-5 Yapısal Stabilité	SP-6 Hasarın Göz Önüne Alınmadığı
NP-A İşlevsel	1-A Kullanıma Devam (B)	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B Hemen Kullanım	1-B Hemen Kullanım (IO)	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C Can Güvenliği	1-C	2-C	3-C Can Güvenliği (LS)	4-C	5-C	6-C
NP-D Azaltılmış Hasar	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E Hasarın Göz Önüne Alınmadığı	NR	NR	3-E	4-E	5-E Yapısal Stabilité (CP)	UYGULANAMAZ

Nr: Önerilmez

Ls: Can Güvenliği

Cp: Göçme Öncesi

IO: Hemen Kullanım

5.2.1.2. Yapısal Performans Seviyeleri

Hemen kullanım performans seviyesi SP-1: Depremden sonra yapıda çok sınırlı hasar olduğu görülür. Yapının dayanım özellikleri ve kapasitesinde bir değişim olmaz. Can güvenliği riski yoktur [42].

Kontrol Edilebilir Hasar Aralığı SP-2: Hemen kullanım ile can güvenliği seviyesi arasında kalır. Can güvenliği sağlanırken hasar minimum düzeydedir [42].

Can güvenliği performans Seviyesi SP-3: Deprem sonrası yapının taşıyıcı sisteminde hasar oluşur fakat yapıda göçme oluşmaz. Yapının taşıyıcı sistemi işlevsiz hale gelmez. Yapı can güvenliği riski oluşturmaz fakat deprem sonrası yapının güçlendirilmesi gerekir [42].

Sınır güvenlik Aralığı SP-4: Can güvenliği ile yapısal stabilite arasında kalan bir performans seviyesidir [42].

Yapısal Stabilite performans Seviyesi SP-5: Bu performans seviyesinde yapının taşıyıcı sistemi hasar görmüştür. Yapıda kısmi veya toplu göçükler oluşur. Yapının yanal rijitliği ve yük taşıma kapasitesi önemli derecede düşse de yapı hareketli ve sabit yükleri taşır. Devam eden artçı depremler yapının yıkılmasına sebep olabilir. Önemli yaralanmalar görülebilir [42]. Yapısal performans seviyeleri ve aralıkları Tablo 5.2’ de özetlenmiştir.

Tablo 5. 2. Yapısal Performans seviyeleri ve aralıkları [42].

Performans Seviyesi	Performans Aralığı	Tanım
SP-1		Hemen kullanım performans seviyesi
	SP-2	Kontrol edilebilir hasar performans aralığı
SP-3		Can güvenliği performans seviyesi
	SP-4	Sınırlı güvenlik performans aralığı
SP-5		Yapısal stabilite performans seviyesi
SP-6		Hasarın göz önüne alınmadığı performans seviyesi

5.2.1.3. Yapı Performans Seviyeleri

Taşıyıcı sistemin durumunu gösteren performans seviyesi ile taşıyıcı olmayan elemanların durumunu gösteren performans seviyelerinin birleştirilmesiyle oluşur.

Kullanıma devam performans seviyesi 1-A (B): Bu seviyede, deprem sonrası yapı işlevselliğini korumaktadır. Can güvenliğini tehlikeye atan hiçbir risk yoktur [42,43].

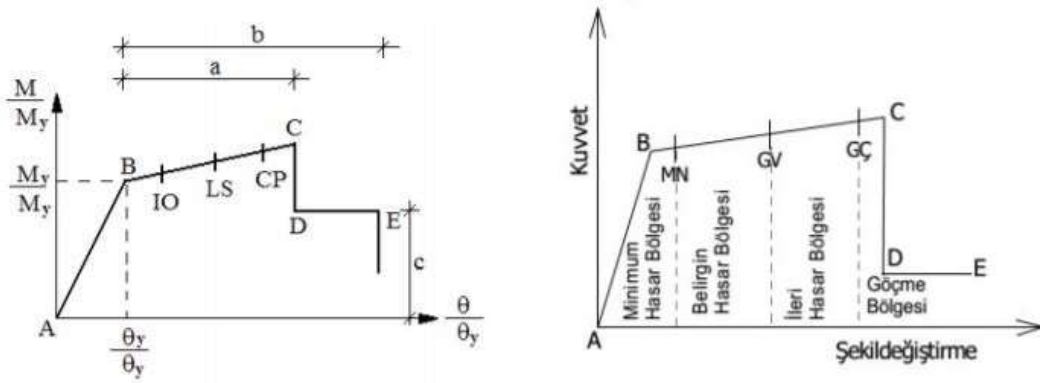
Hemen Kullanım Performans Seviyesi 1-B (IO): Yapı taşıyıcı sisteminde hasar oluşmaz. Yapı deprem sonrası hemen kullanılabilir [42,43].

Can Güvenliği Performans Seviyesi 3-C (LS): deprem sonrası yapısal ve yapısal olmayan hasar oluşur. Can güvenliği riski yoktur [42,43].

Yapısal Stabilité (Toptan göçmenin önlenildiği) Performans Seviyesi 5-E (CP):

Yapı düşey yükleri taşıyabilirken yatay yüklere karşı dayanımını yitirmiştir. Taşıyıcı sistem büyük hasar görmüştür. Yıkılan ve düşen parçalardan dolayı can güvenliği riski vardır [42,43].

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi sünek elemanlarda minimum hasar bölgesinde davranış elastik davranışa yakındır. B noktasından sonra elastik davranıştan çıkan sistemde hasar oluşumu gerçekleşmektedir.



Şekil 5.6. Kesit hasar bölgeleri [43]

Yapısal olmayan Sistemler için performans seviyeleri tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5. 3. Yapısal olmayan performans seviyeleri [42,43]

Performans Seviyesi	Tanım
NP-A	İşlevsel performans seviyesi
NP-B	Hemen kullanım performans seviyesi
NP-C	Can güvenliği performans seviyesi
NP-D	Azaltılmış hasar performans seviyesi
NP-E	Hasarın göz önüne alınmadığı performans seviyesi

5.3. Deprem Etkisi

Performansa dayalı tasarımda, yapı için seçilen performans seviyesinin hangi deprem etkisi altında elde edildiğinin bilinmesi gerekmektedir.

5.3.1. Servis Deprem

50 yıllık periyotlar içinde meydana gelme olasılığı %50 olan depremlerdir. Bu tarz depremlerin olma olasılığı çok yüksek olmasına karşın şiddeti düşük olmaktadır [42].

5.3.2. Tasarım depremi

50 yıllık periyotlar içinde meydana gelme olasılığı %10 olan depremlerdir. Ortalama dönüş periyodu yaklaşık 500 yıl olan bu depremin yapının ömrü boyunca olma ihtimali düşüktür [42].

5.3.3. Maksimum Deprem

50 yıllık periyotlar içinde meydana gelme olasılığı %5 olan depremlerdir. Ortalama dönüş periyodu yaklaşık 2500 yıl olacak şekilde, bölgede jeolojik bilgiler göz önüne alınarak belirlenebilecek en büyük deprem olarak kabul edilir. Maksimum deprem etkileri tasarım depremi etkilerinin yaklaşık 1,25-1,5 katıdır. Deprem yönetmeliklerinde tasarım depremi etkisinin, bina önem katsayısı ile artırılması sonucunda maksimum deprem tanımlanmaya çalışılır [42]. Deprem etkisi parametreleri tablo 5.4'de özet olarak verilmiştir.

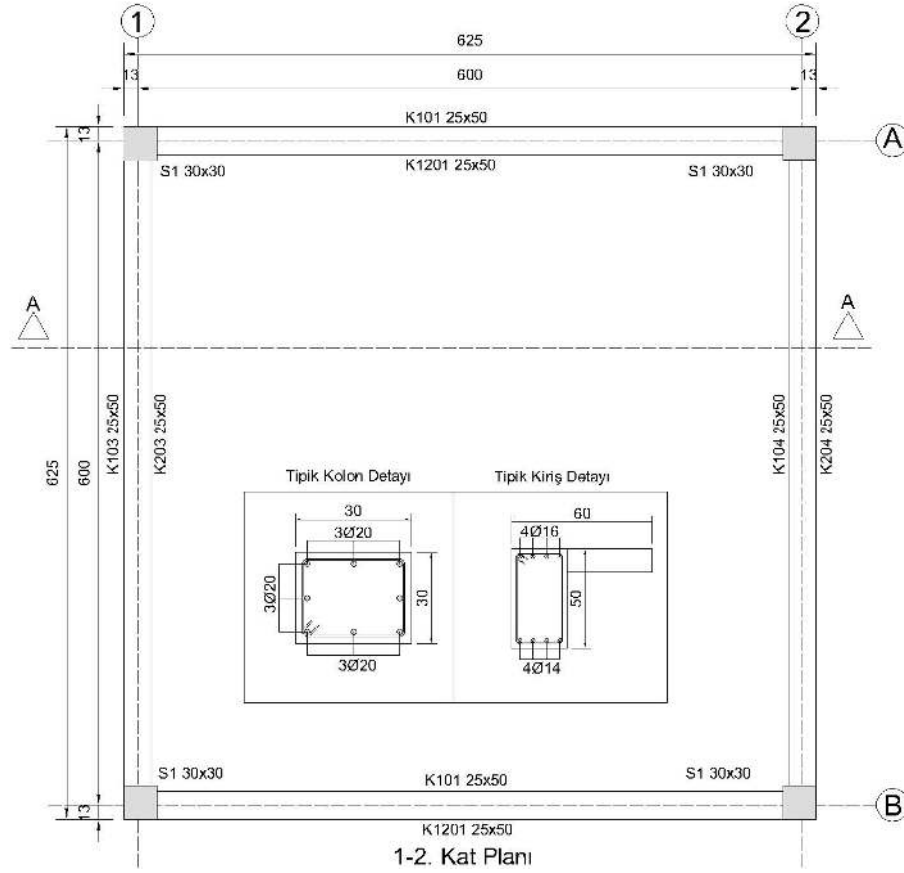
Tablo 5. 4. Deprem Etkisi Parametreleri [42]

Aşılma Olasılığı	Esas Alınan Zaman Aralığı	Ortalama Dönüş Periyodu
% 50	50 yıl	72 yıl
% 20	50 yıl	225 yıl
% 10	50 yıl	474 yıl
% 5	50 yıl	2475 yıl

5.4. Sönümleyici cihaz kullanılan ve Kullanılmayan Özdeş Yapılar İçin Tasarım Depremi Altında Performans Araştırması Yapılması

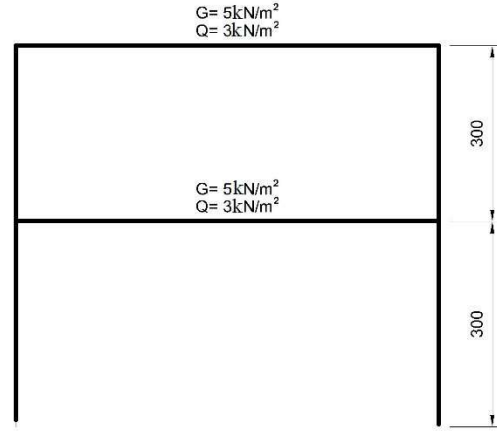
5.4.1. Sönümleyici Cihaz Kullanılmayan Binanın Performans Düzeyinin Araştırılması

Plan ve kesiti şekil 5.7’de verilen 2 katlı klasik yapı, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremi altında itme analizi yöntemi kullanılarak performans analizi yapılacaktır.



Şekil 5.7. Performans analizi yapılan yapıya ait kat planları

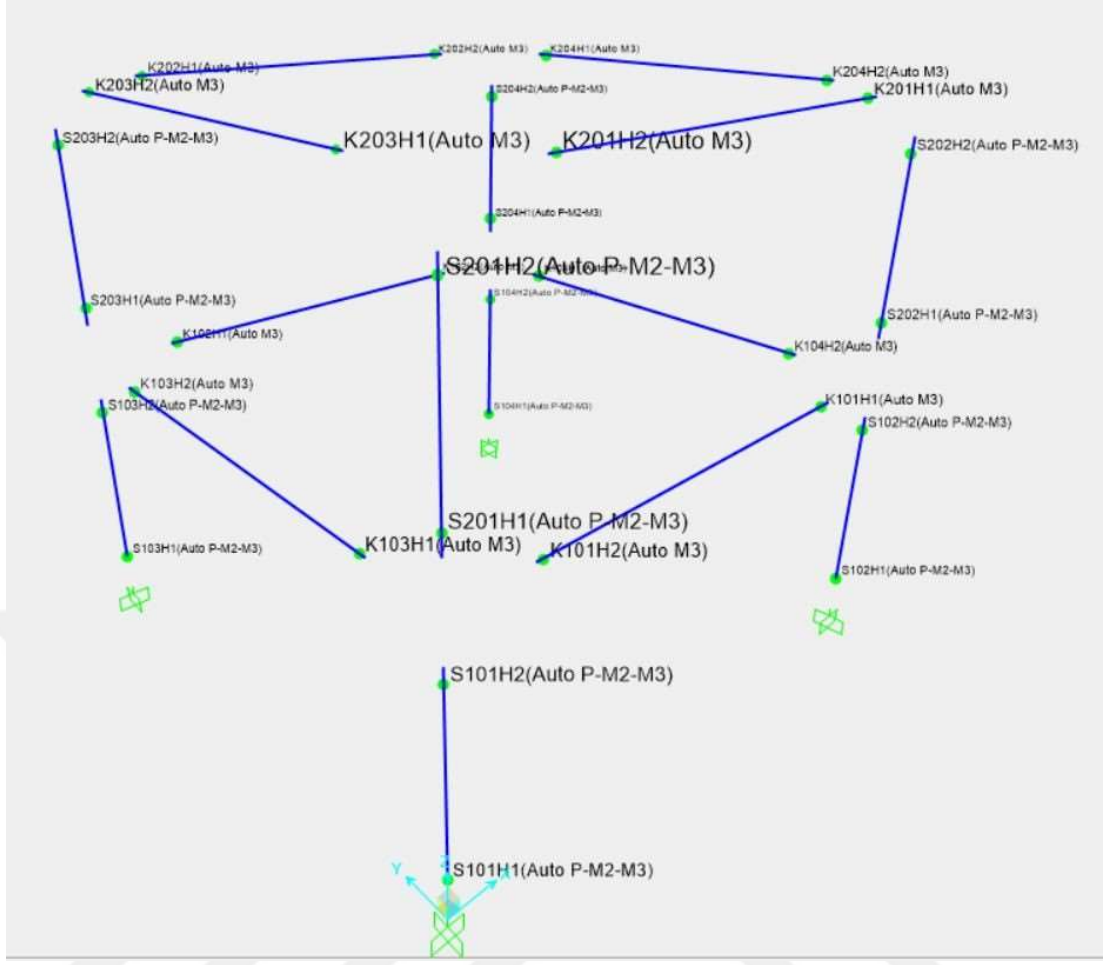
Ölü (G) ve hareketli (Q) yükler yapı döşemelerine yayılı yük olarak verilmiştir. Yapı kesiti ve döşemelere verilen yükler şekil 5.8’de görülmektedir.



A-A Kesiti

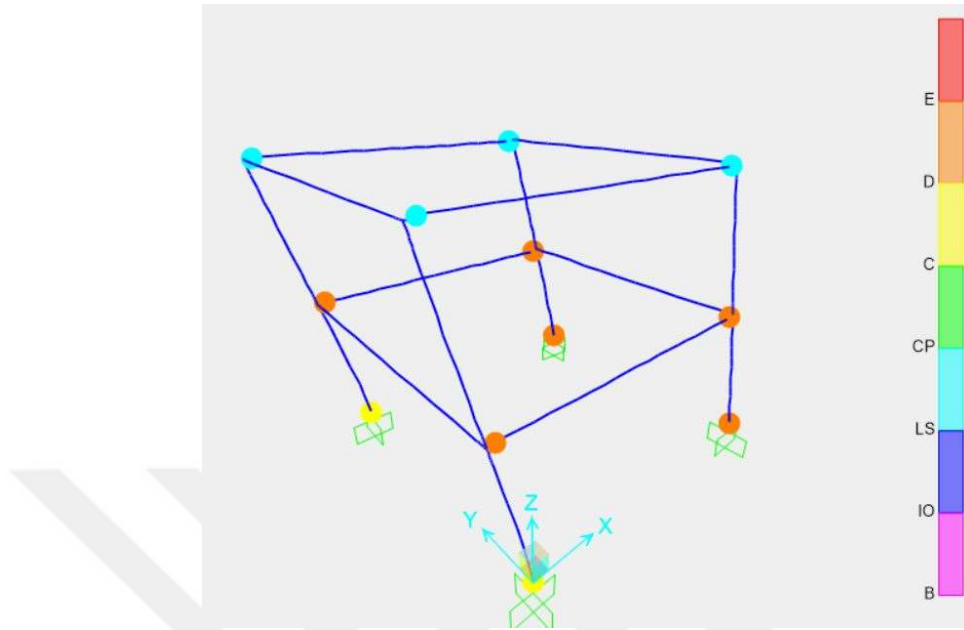
Şekil 5.8. Sönümleyici cihaz kullanılmayan yapı için yükleme durumu

Sap 2000 programında sonlu elemanlar modeli oluşturulan yapının tüm kolon ve kiriş elemanlarına Fema 356’ya uygun olarak şekil 5.9’da görüldüğü gibi plastik mafsallar tanımlanmıştır. Analiz sonrasında yapıda oluşabilecek hasar durumları plastik mafsallar aracılığıyla belirlenmiştir.



Şekil 5.9. Sönümleyici cihaz kullanılmayan yapıda plastik mafsal tanımı

Yapıya itme analizi uygulanmış ve yapılan analiz sonrasında plastik mafsallarda oluşan hasar durumları şekil 5.10'da ki gibi oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.10. Sönümleyici kullanılmayan yapıda performans durumu

Analizi yapılan yapı, zemin ve 1. katta 4 adet kiriş ve 4 adet kolondan oluşan tek açıklıklı bir betonarme çerçeveden oluşmaktadır. Yapı x ve y yönlerinde simetrik olduğu için sadece x yönü için itme analizi yapılmıştır.

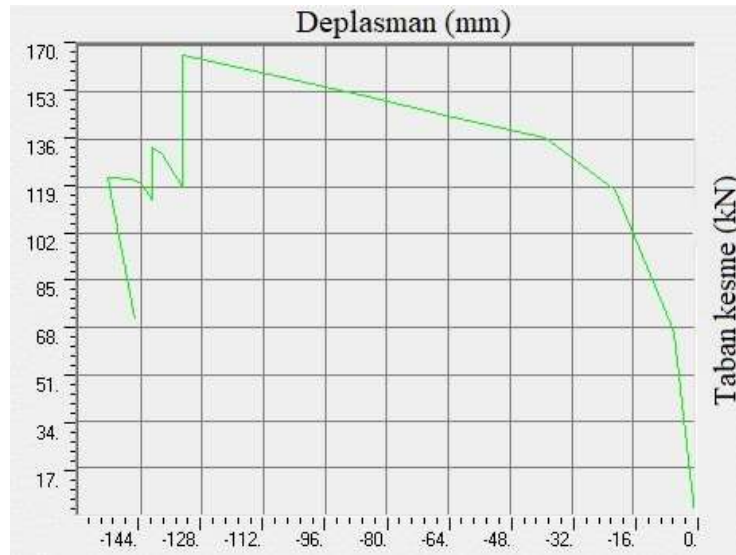
İtme analizi sonrasında, zemin kat kolonlarının göçme durumuna geçtiği şekil 5.10'da açıkça görülmektedir. Zemin kattaki tüm kirişler göçme durumuna geçerken 1. Kat kirişlerinde can güvenliği durumu görülmektedir. Yapıya ait performans düzeyleri tablo 5.5'deki gibidir.

Tablo 5. 5. Sönümleme sistemi kullanılmayan yapı elemanlarının hasar durumları

	Toplam Adet	B-IO (Minimum)	IO-LS (Belirgin)	LS-CP (İleri)	Toplam
Kiriş (Zemin kat)	2	-	-	2	2
Kiriş (1. kat)	2	-	-	2	2
Kolon (Zemin kat)	4	-	-	4	4
Kolon (1. kat)	4	4	-	-	4

Tablo 5.5’den açıkça görüldüğü gibi zemin kat kolon ve kirişlerinde ileri derecede hasar meydana gelmekte ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler için (3-C) can güvenliği performans düzeyini karşılamadığı görülmektedir.

Yapının taban kesme kuvvetleri incelendiğinde, şekil 5.11’de görüldüğü gibi yapının taban kesme kuvveti taşıma kapasitesinin 170 kN olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11. Sönümleme sistemi kullanılmayan yapının taşıyabileceği maksimum taban kesme kuvveti grafiği

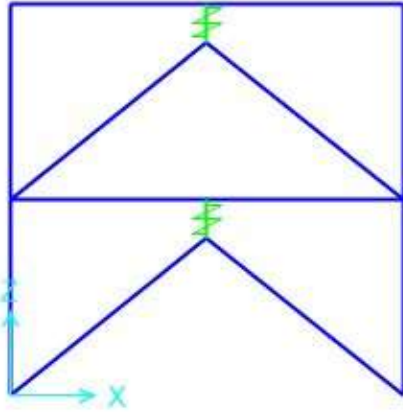
5.4.2. Sönümleyici Cihaz Kullanılan Binanın Performans Düzeyinin

Araştırılması

Şekil 5.7 ve 5.8’de verilen kat planı ve yükleme durumu verilen yapının x yönündeki deprem yüklerinin sönümlenmesi amacıyla, zemin katta 2 adet, 1. Katta 2 adet olmak üzere toplam 4 adet 160 kN kayma yükü kapasitesine sahip sönümleyici cihaz kullanılmıştır.

5.4.2.1. Sönümleyici Özellikleri

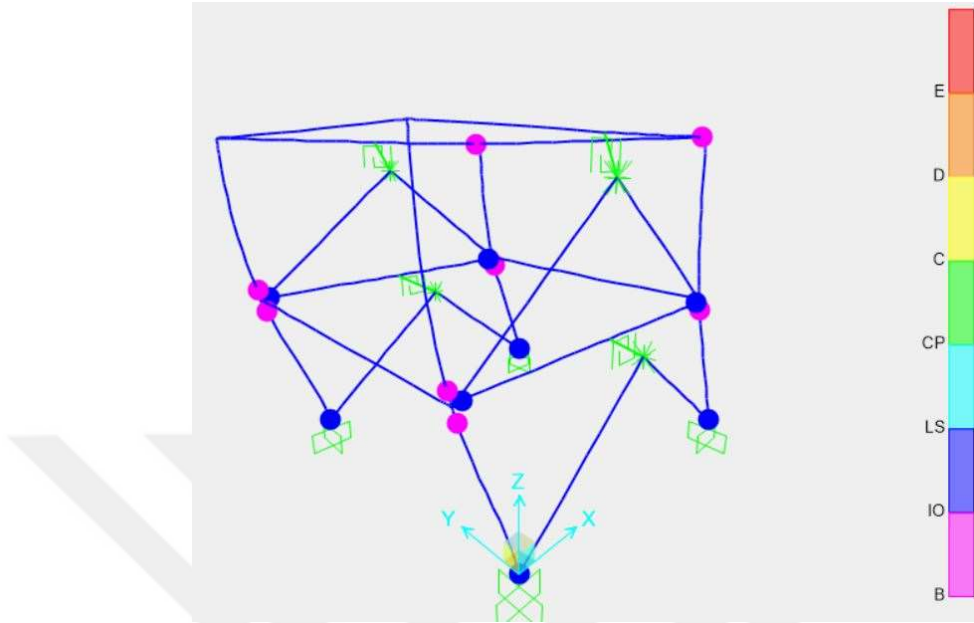
Yapının performans araştırması nonlinear yöntemlerle araştırılacağı için sönümleyiciler nonlinear olarak tanımlanmıştır. Sönümleyiciler yapıya şekil 5.12’de görüldüğü gibi HEA 200 profillerden oluşturulmuş ters V şekilli diyagonaller üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.12. Sönümleme sistemli yapı

Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici üzerine yapılan deneyler sonrasında 160 kN kayma kapasitesinin elde edildiği ön germeli durum için şekil 5.13’de yer alan histerik grafik elde edilmiştir. Sönümleyicinin yapı üzerindeki davranışının temsil etmesi için histerik grafikte yer alan rijitlik (k), efektif rijitlik (K_{eff}) ve kayma yükü değeri sisteme plastik wen- link elemanı vasıtasıyla tanıtılmıştır.

Yapıya itme analizi uygulanmış ve yapılan analiz sonrasında plastik mafsallarda oluşan hasar durumları şekil 5.15’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.15. Sönümleyici kullanılan yapıda performans durumu

Yapı, zemin ve 1. katta yer alan 4 adet kiriş ve 4 adet kolondan oluşan tek açıklıklı betonarme bir sisteme sahiptir. Yapının x ve y yönleri simetrik olduğu için sadece x yönü için itme analizi yapılmıştır.

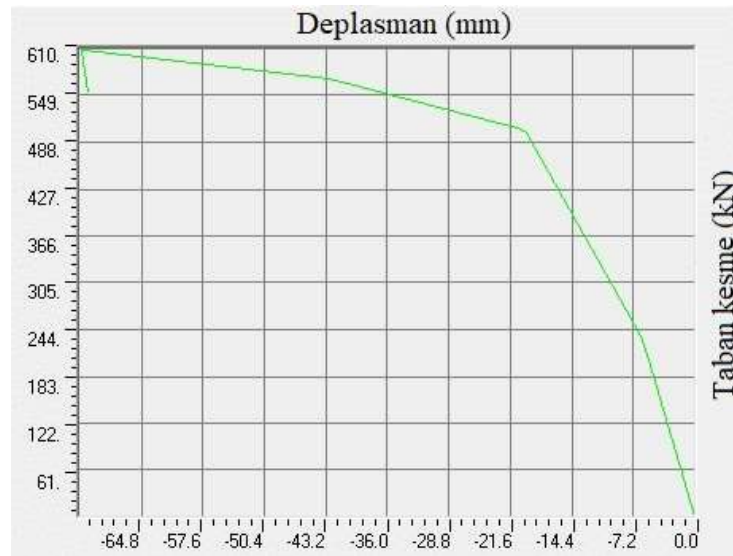
İtme analizi sonrasında, yapıda yer alan tüm kolon ve kirişlerin (IO) seviyesinde ve altında olduğu şekil 5.15’de açıkça görülmektedir. Yapıya ait performans düzeyleri tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5. 6. Sönümleme sistemi kullanılan yapı için hasar durumları tablosu

	Toplam Adet	B-IO (Minimum)	IO-LS (Belirgin)	LS-CP (İleri)	Toplam
Kiriş (Zemin kat)	2	2	-	-	2
Kiriş (1. kat)	2	2	-	-	2
Kolon (Zemin kat)	4	4	-	-	4
Kolon (1. kat)	4	4	-	-	4

Tablo 5.6’da açıkça görüldüğü gibi yapıda minimum düzeyde hasar meydana gelmektedir ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler için (3-C) can güvenliği performans düzeyini karşıladığı görülmektedir.

Yapının taban kesme kuvvetleri incelendiğinde, şekil 5.16’da görüldüğü gibi yapının taban kesme kuvveti taşıma kapasitesinin 610 kN olduğu görülmektedir. Sönümleyici cihaz kullanılan yapıda taban kesme kuvveti taşıma kapasitesinin sönümleme sistemi kullanılmayan yapıya nazaran 3.6 kat arttığı görülmektedir.



Şekil 5.16. Sönümleme sistemi kullanılan yapının taşıyabileceği maksimum taban kesme kuvveti grafiği

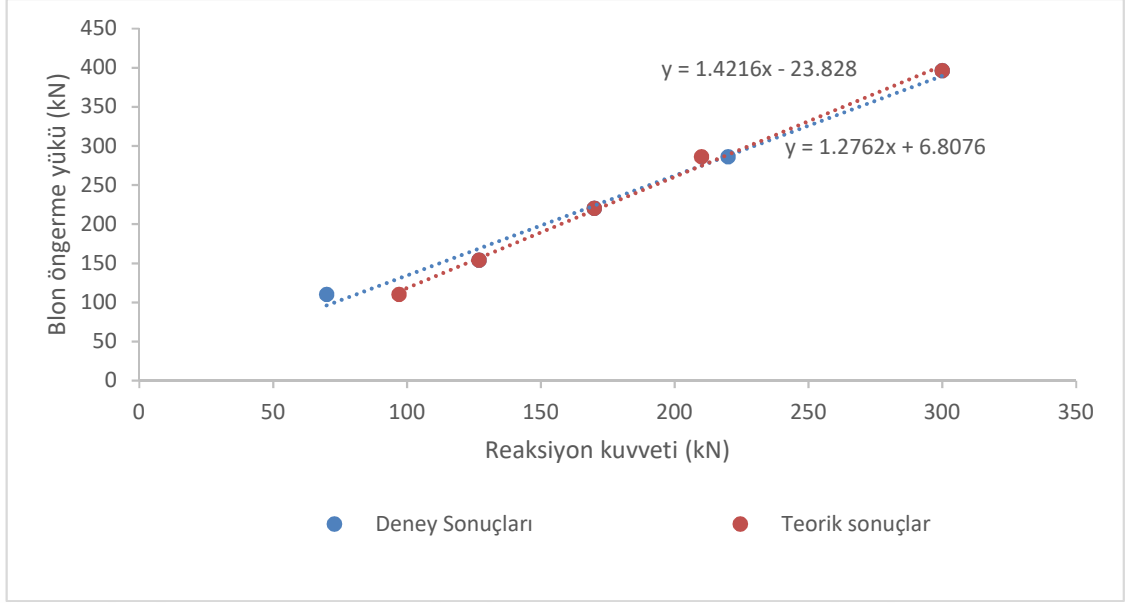
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, çok yönlü çalışacak şekilde tasarımı yapılan mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyicinin saplama gerdirme elemanlarına uygulanan farklı ön germe yükleri altında davranışı deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli, deneylerde kullanılan sönümleyici prototipini en iyi temsil edecek şekilde oluşturulmuştur.

İlk olarak, sönümleyicinin sonlu elemanlar katı modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman modeli üzerinde, tasarlanan saplama elemanlarına farklı ön germe kuvvetleri uygulanarak sönümleyicinin farklı ön germe değerleri altındaki kuvvet deplasman ilişkileri incelenmiştir. Sönümleyiciyi oluşturan tüm çelik elemanların seçimi sonlu elemanlar modeli üzerinde oluşan gerilmeler dikkate alınarak seçilmiştir.

Detaylı çizimleri oluşturulan sönümleyicinin tüm çelik elemanları CNC dik işlem tezgahlarda işlenmiştir. Ege üniversitesi inşaat mühendisliği yapı laboratuvarında yer alan 300 kN çekme 500 kN itme kapasitesine sahip reaksiyon duvarında test edilen sönümleyicinin, farklı saplama ön germe yükleri altında elde edilen kuvvet- deplasman ilişkileri ve farklı frekanslar altındaki davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen histerik kuvvet-deplasman grafiklerinden, kayma yükü, rijitlik (k) ve efektif rijitlik (keff) değerleri çıkartılarak sap 2000 programında sönümleyicinin davranışlarını temsil eden link elemanlar tanımlanmıştır. Sönümleyicinin yapı üzerinde davranışını görmek amacıyla tek açıklıklı 2 katlı bir yapıya sönümleyici cihaz kullanılarak ve kullanılmayarak sap 2000 programında performans analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrasında aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Mafsallı sürtünme tipi sismik sönümleyicinin şekil 6.1’de görüldüğü gibi saplama ön-germe kuvveti-deplasman ilişkileri deneysel ve teorik olarak incelendiğinde sonuçların %93, 87 oranında örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 6.1. Deney ve teorik çalışmalardan elde edilen blon ön-germe-deplasman ilişkilerinin kıyaslanması

Şekil 6.1’de yer alan grafiklere ait denklemler kullanılarak ihtiyaç duyulan reaksiyon kuvvetleri için gerekli olan blon öngerme değerleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Bu durum reaksiyon kuvvetlerinin deney yapılmadan elde edilmesine olanak sağladığı için uygulamada pratik bir yöntem olarak kullanılabilir.

Sönümleyici cihazın 0.001, 0.003 ve 0.005 Hz değerlerinde test edilmesi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri incelendiğinde kayma yüklerinin sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum hem frekans hem de sürtünmeden dolayı oluşan ısı değişimlerinin kayma yükü üzerinde etkisinin olmadığı anlamına gelmektedir. Yapısal hesaplarda cihaz parametreleri tanımlanırken frekans ve ısı farklılıklarının ihmal edilmesi büyük kolaylık sağlayacaktır.

Sönümleyici cihazın, farklı saplama ön germe yükleri altında yapılan deneylerde hem itme hem de çekme testleri yapılmıştır. İtme ve çekme testlerinden elde edilen grafiklerin histerik olduğu ve kayma yüklerinin sabit kaldığı görülmüştür.

Mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyicinin yapı üzerindeki performansını görmek üzere, tek açıklıklı 2 katlı bir tasarım yapısı sönümleyici cihaz kullanılarak ve kullanılmayarak analiz edilmiştir. Sönümleyici cihaz kullanılmayan

yapının göçme bölgesine geçtiği görülürken sönümleyici cihazın kullanıldığı yapıda minimum hasar oluştuğu tespit edilmiştir.

Performans analizi sonrasında sönümleyici cihaza sahip yapının taban kesme kuvveti taşıma kapasitesinin sönümleyici cihaza sahip olamayana göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Ele alınan yapı için bu oranın 3,6 kat olduğu görülmektedir.

Sönümleyici cihaz kullanılan ve kullanılmayan aynı özellikli yapıların periyot ve çatı katı deplasmanları incelendiğinde, kullanılan sönümleyici cihaz adedi ve kapasitesine bağlı olarak periyot ve deplasman değerlerinde kayda değer düşüşler yaşandığı görülmüştür.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, depremelerin yapılar üzerinde oluşturduğu enerjiyi sönümleyerek hasarın en düşük seviyeye düşürülmesi amacıyla mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici isimli bir sürtünme tipi cihaz geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar yapılarak sönümleyici cihazın reaksiyon kuvveti - deplasman ilişkileri kıyaslanmış, farklı frekanslar altındaki davranışları ve sönümleyici cihazın yapısal sistemler üzerindeki davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1- Sönümleyici cihazın sonlu eleman analizleri ve deneysel yöntemlerle elde edilen reaksiyon kuvveti – blon öngerme yükü grafiklerinin %93,87 oranında benzer olduğu görülmüştür.
- 2- Sönümleyici cihazın farklı frekanslar altında yapılan deneyleri sonucunda reaksiyon kuvveti – deplasman grafiklerinin değişmediği görülmüştür.
- 3- Sönümleyici cihazın yapı üzerindeki performansı incelendiğinde, yapı periyotları ve çatı deplasmanlarını etkili bir şekilde düşürdüğü, yapı taban kesme kuvveti taşıma kapasitesini arttırdığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar ve deneysel çalışmaları yapılan sönümleyici cihazın yapı performansını olumlu yönde etkilediği ve deprem sönümleme sistemi olarak alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- 1- Mafsallı sürtünme tipi sismik sönümleyicinin deneysel ve teorik çalışmaları incelendiğinde her iki çalışma için saplama ön germe – reaksiyon grafiklerinin birbirine çok yakın lineer eğriler olduğu görülmektedir. Lineer eğrilerin denklemleri kullanılarak, istenilen reaksiyon kuvveti (kayma yükü) değerlerine karşılık gelen saplama sıkma değerleri rahatlıkla elde

edilebilir. Uygulamada, ihtiyaç duyulan kayma yükleri için deneylerden elde edilen saplama ön germe – reaksiyon grafiklerinin kullanılması zaman ve maliyet açısından çok avantajlı ve önerilen bir yöntem olacaktır.

- 2- Sönümleyici cihazın kayma kapasitesi F_s , sürtünme katsayısı ve saplama ön germe kuvvetlerine bağlı olduğu için ($F_s = m \cdot \mu$) cihaz kayma yükü kapasitesinin arttırılması için küçük ebatlı çok sayıda küresel mafsalları kullanarak cihaz kapasitesi arttırılabilir.
- 3- Farklı özelliklerde sürtünme pedleri kullanılarak kuvvet – deplasman ilişkilerini nasıl etkilediği araştırılabilir.
- 4- Küçük ölçekli betonarme ve çelik yapılar, sönüm cihazı kullanılmadan ve farklı kapasitelerde sönümleyiciler kullanılarak sarsma tablası deneyi ile test edilerek her iki durum için davranışlar detaylı olarak kıyaslanabilir.
- 5- Diğer sönümleme sistemlerine ilave olarak, küresel mafsallı özelliğine sahip olan mafsallı özellikli sürtünme tipi sismik sönümleyici, yapı üzerine uygun yerleştirilme koşulu ile çok yönlü sönüm avantajı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Umachagi, V., Venkataramana, K., Reddy, G.R., Verma R. Applications of dampers for vibration control of structures. 2013, 6-11.
- [2] Monir, H.S., Zeynali, K. A modified friction damper for diagonal bracing of structures. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 87 17-30.
- [3] Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 2009, 159 s
- [4] Pall, A.S., Pall, R. Friction dampers for seismic control of buildings. Elevent World conference on earthquake Engineering, Canada, 1996,8s.
- [5] Belash, T. Dry friction dampers in quake-proof Structures of Buildings. 2015, 7 397-403.
- [6] Tirali, B. Tip Okul Binalarının Performans Analizi, Sürtünme Söndürücüler ve Sürtünme Plakaları ile Güçlendirilmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Kocaeli, 2010, 175s. (Yüksek lisans Tezi)
- [7] Aldemir, Ü., Aydın, E. Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar. Türkiye Mühendislik Haberleri Sayısı, 435-2005/1, 9s.
- [8] Michael, D.S., Michael C.C. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. Elsevier Engineering Structures, 1999, 21 469-487.
- [9] Mualla, I.H., Jakupsson, E. D., Nielsen, L.O. Structural behaviour of 5000 kN damper, Denmark, 2010, 8s.
- [10] Milani, A.S. Torsional Hysteretic Damper For Seismic Protection of Structures, Middle East Thecnical Universty, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2014, 439s. (Doktora Tezi)
- [11] Günaydın, A., Gören, H. Adas elamanı kullanılacak çelik yapılarda deprem etkilerinin azaltılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2010, 1 33-48.
- [12] E, Martinez-Romero. Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures. Earthquake Spectra, 1993, 9 581-626.
- [13] Mulletti, E. Seismic Response of High Rise Buildings Using Friction Damper, Epoka Universty Faculty Of Arcitecture And Engineering, Civil Engineering, Trina, 2014, 112s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [14] Koç, O., Mutlu, İ., Taşgetiren, S. Fren balata sisteminde sürtünme sonucu Olusan ısı transferi ve termal gerilme analizi. Tasıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2009, 1(2) 9-20.
- [15] Deringöl, A.H. Effect Of Friction Dampers On Seismic Performance Of Buildings. Gaziantep Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Gaziantep, 2013, 91s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Vezina, S., Pall, R.T. Seismic retrofit of muctc building using friction dampers. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, August 1-6, 2014, Montreal.
- [17] Mualla, H., Nielsen, L.O., Belev, B., Liao, V.I., Loh, C.H., Agrawa, C. Numarical predictions of shaking table tests on a full scale friction-damped structure, 12th European Conference on Earthquake Engineering paper reference 190, 2002, Denmark.

- [18] Mirtaheeri, M., Zandi, A.P., Samadi, S.S., Samanii, H.R. Numerical and experimental study of hysteric behaviour of cylinditral friction dampers. Engineering Structures. 2011, 33 3647-3656.
- [19] Shirkhani, S., Mualla, I.H., Shabakhty, N., Mousavi, S.R. Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method. Journal of Constructional Steel Research. 2015, 107 211-222.
- [20] Lee, J., Wang, Y., Kang, H., Kim, J. Seismic performance of steel plate slit friction hybrid. Journal of Constructional Steel Research. 2017, 136 128-139.
- [21] TT, Soong. Active Structural Control: Theory and Practice, Longman Scientefic & Technical, Newyork, 1990, 204p.
- [22] Darılmaz, K. Depreme dayanıklı betonarme binaların tasarımına giriş. Yapı yazılımı yayınları, İstanbul, 2015, 241s.
- [23] Chopra, A. K, Dynamics structures theory and applications to earthquake engineering, 3rd. Printece Hall. 7 2011,980p.
- [24] Manohar, H., Madhekar, S. Seismic design of RC buildings theory and practice. Springer transactions in civil and environmental engineering, New Delhi, India, 2015, 465p.
- [25] Erdemli, M.E. Sönümleyiciler ile bağlı betonarme perde duvarlı yüksek yapılarda eşdeğer sönümleme yöntemlerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, inşaat mühendisliği anabilim dalı, İstanbul, 2015, 101s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [26] ASCE 7/10 Minimum Design Loads For Buildings and Odher Structures., Published by American Society of Civil Engineers, USA, 2010, 253s.
- [27] Yüce, S. Otomatik Fren Balatası Sürtünme Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Mersin Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı Mersin, 2013, 118s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [28] Arıkan, S.A. Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte uygulamaları, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 18s.
- [29] Hökelekli, E. Manisa Hafsa Sultan Camii deprem davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle incelenmesi. Manisa Celalbayer Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Manisa, 2015, 172s. (Doktora Tezi)
- [30] Marc, Volume A: Theory and User Informatiion. MSC Softwere Corporation, Newport Beach, 2017, 984s.
- [31] Marc Mentant, Users guide. MSC Softwere Corporation, USA,1999,624s.
- [32] Madduru Phanindra Reddy., A. Aldrin Sam William., M. Mohan Prashanth., S.N. Sabaresk Kumar., K. Devendranath Ramkumar., N. Arivazhagan., S. Narayanan. Assessment of Mechanical Properties of AISI 4140 and AISI 316 Dissimilar Weldments, 7th International Conference on Materials for Advanced Technologies. 2014, Singapore. (Science direct, Procedia Engineering, 75 29-33)
- [33] Kesti, E. Ç- 4140 Çeliğinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2009, 99s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [34] Ertan, R., Yavuz, N. Balata malzemelerinde kullanılan yapısal malzemenin tribolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Bursa, 2010, 15 169-177.
- [35] Teknik destek grubu, Test-box 1001 8 kanal statik veri toplama sistemi, Ankara, 2009, 14s.
- [36] Talati, H., Jalalifar, S. Analiysis of heat conduction in a disk brake system. Asian Journal of Applied Sciences, Malaysia, 2009, 45 1047-1059.

- [37] Adhikari, S. Damping Models for Structural Vibration. Cambridge University Engineering Department, A dissertation submitted to the University of Cambridge for the Degree of Doctor of Philosophy, U.K, 2000, 228s. (Doktora Tezi)
- [38] 1997 Uniform Building Code. Structural Design requiraments, USA, 1997, 545s.
- [39] Computure and Structure INC. Etabs 2016 CSI Analysis referance manual., Berkeley, USA, 2016, 556s.
- [40] Yılmaz, C. Statik İtme Analiziyle Mevcut Bir Betonarme Yapının performans Değerlendirmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2008, 111s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [41] Department of homeland security federal emergengy management agency, Fema 440 improvement of nonlinear static seismic analiysis procedüres, Washington D.C, 2005 p. 392.
- [42] Kesim, B, Stattik İtme Analizi Yöntemiyle Mevcut Bir Betonarme Yapının, İstanbul teknik üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2005, 116s. (Yüksek lisans Tezi)
- [43] Department of homeland security federal emergengy management agency, Fema 356 Prestandard and commentary fort he seismic rehabilitation of buildings, Washington D.C, 2000 p. 518.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Recep SUK

Doğum Yeri ve Yılı : Ordu, 1978

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : receptsuk@hotmail.com, recep.suk@sismodizayn.com

Eğitim Durumu

Lise : Çınarlı Meslek lisesi, 1997

Lisans : Gazi Üniversitesi, Yapı öğretmenliği bölümü, 2005

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, inşaat mühendisliği bölümü, 2019(Devam)

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, inşaat mühendisliği bölümü, 2015

Mesleki Deneyim

Berten Engineering USA 2005-2006

Enka inşaat (Rusya) 2006-2008

Meammar Arabi (Libya), BC construction (Irak), Feka inşaat (Afganistan), İlk inşaat (Azerbaycan), Megapol inşaat (Türkiye) 2009-2014

Sismo Dizayn Grup (Türkiye) 2018-Halen

Yayınları

Kozanoğlu, C., SUK, R. Çelik malzemeyle yapılmış stadyum tribün çatısının taşıyıcı sisteme bağlı maliyet karşılaştırılmasının yapılması. CBÜ Fen bilimleri Dergisi, 2015, 2 183-193.

SUK, R. Çelik Malzemeyle Yapılmış Stadyum Tribün Çatısının Taşıyıcı Sisteme Bağlı Maliyet Karşılaştırılmasının Yapılması. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, inşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2015, 98s. (Yüksek lisans Tezi)